



HAL
open science

Etude de l'impact des conditions géologiques et climatiques sur l'efficacité énergétique des systèmes géothermiques de surface

Mathias Cuny

► **To cite this version:**

Mathias Cuny. Etude de l'impact des conditions géologiques et climatiques sur l'efficacité énergétique des systèmes géothermiques de surface. Géotechnique. Université de Strasbourg, 2017. Français. NNT : 2017STRAD028 . tel-01716379

HAL Id: tel-01716379

<https://theses.hal.science/tel-01716379>

Submitted on 23 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE DOCTORALE MSII

Laboratoire ICube – Département Mécanique (D-M)

THÈSE présentée par :

Mathias CUNY

soutenue le : 29 septembre 2017

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Strasbourg**

Discipline/ Spécialité : ENERGETIQUE

Etude de l'impact des conditions géologiques et climatiques sur l'efficacité énergétique des systèmes géothermiques de surface

THÈSE dirigée par :

FOND Christophe

SIROUX Monica

Professeur, Laboratoire ICube, Université de Strasbourg

Professeur, Laboratoire ICube, INSA de Strasbourg

THÈSE encadrée par :

LIN Jian

Maître de conférences, Laboratoire ICube, Université de Strasbourg

RAPPORTEURS :

EL GANAOUI Mohammed

SALAGNAC Patrick

Professeur, Laboratoire LERMaB, Université de Lorraine

Professeur, Laboratoire LaSIE, Université de La Rochelle

EXAMINATEUR :

FEIDT Michel

Professeur émérite, Laboratoire LEMTA, Université de Lorraine

Remerciements

Je remercie tout d'abord mes encadrants à commencer par Monica, ma directrice de thèse, pour m'avoir initié dans le monde de la recherche. Tu as su instaurer un cadre de travail rigoureux et motivant qui m'ont permis de repousser mes limites. Je remercie également Christophe pour son recul scientifique, ses questions pertinentes, et sa passion de l'électronique. Tu as toujours été présent dans les moments décisifs de cette thèse. Je tiens à remercier tout particulièrement Jian, un vrai partenaire, sans qui ce travail de thèse ne serait pas. Merci pour ton soutien quotidien, ta persévérance sans faille et ta disponibilité. J'ai agréablement apprécié travailler avec toi durant ces trois années.

Je remercie chaleureusement l'ensemble des membres du jury : Mohammed El Ganaoui, Michel Feidt et Patrick Salagnac qui m'ont fait l'honneur de rapporter et d'examiner mon travail de thèse. J'ai apprécié vos remarques constructives et vos conseils avisés pour perfectionner ce travail de recherche.

Je tiens à remercier également les collègues de l'INSA : Denis, Benjamin, François et Jean-Baptiste pour leurs conseils et leurs discussions. Je remercie aussi les collègues de l'IUT Robert Schuman (département Génie Civil) : Fabrice, Hugo, Komla, Michel, Pierre, Sandrine, Violaine, ... Un grand merci à Moustafa et à Patrice pour votre aide précieuse et votre disponibilité pendant la réalisation des dispositifs expérimentaux. Patrice, j'ai adoré nos discussions sur notre passion du sport. Je remercie également Vincent pour son aide informatique et nos conversations au déjeuner.

Je remercie aussi mes collègues de bureau pour la bonne ambiance. Merci à Daniel S, notre prof d'anglais national, pour son humour quotidien et contagieux. Merci à Léon, partenaire de thèse plus jeune d'un an, pour sa passion de la recherche, le partage des "soucis" de thésard, les "gamelles" du midi et les fameuses parties d'échecs.

Ensuite, je tiens à remercier ma famille pour leur soutien infaillible. Léo, tu as toujours été là pour moi, tu seras toujours mon "frangin" adoré. Ma petite maman, tu as toujours su effacer les doutes et redonner le moral. Petit clin d'œil à mon papa pour avoir eu la motivation de lire et de corriger l'intégralité de cette thèse.

Enfin, je tiens à remercier tout particulièrement Cécile, ma chérie : tu as été en première ligne de tous les aléas, tu as su relativiser les choses (comme toujours), je te remercie pour ta gentillesse, ta présence, ce que tu es et ce que l'on partage. Que cela dure ...

Merci à tous.

Table des matières

Liste des figures	v
Liste des tableaux	xi
Introduction	xiii
Démarche suivie	xv
1 Contexte de l'étude	1
1.1 Introduction	1
1.2 La géothermie	2
1.2.1 Définition	2
1.2.2 Développement de la géothermie	3
1.2.3 Les systèmes géothermiques de surface	6
1.3 La plateforme géothermique à l'Université de Strasbourg	12
1.3.1 Le projet TEM ³	12
1.3.2 Présentation de la plateforme géothermique	14
1.3.3 Instrumentation de la plateforme	15
1.3.4 Traitement des données	18
2 État de l'art des modèles d'échangeurs de surface et des facteurs impactant sur ses performances énergétiques	21
2.1 Grandeurs caractéristiques	22
2.2 Les modèles avec des propriétés thermo-physiques du sol homogènes et constantes	27
2.2.1 Modèle de Trombe et Bourret (1993)	27
2.2.2 Modèle de Hollmuller (2003)	28
2.2.3 Modèle de Thiers (2008)	30
2.2.4 Modèle de Philippe (2010)	31
2.3 Modèles prenant en compte les propriétés hydriques du sol	33
2.3.1 Modèle de Dunand (1982)	33
2.3.2 Modèle de Mihalakakou (1994)	35
2.3.3 Modèle de Piechowski (1996)	36
2.3.4 Modèle de Gan (2014)	37

2.4	Les facteurs impactant sur les performances énergétiques des échangeurs de surface	38
2.4.1	Les paramètres de dimensionnement et de fonctionnement des échangeurs	38
2.4.1.1	Paramètres de dimensionnement	38
2.4.1.2	Paramètres de fonctionnement	39
2.4.2	Les conditions climatiques et environnementales	40
2.4.2.1	Conditions climatiques	40
2.4.2.2	Conditions environnementales	40
2.4.3	Les propriétés thermo-physiques du sol	41
2.4.3.1	Conductivité thermique	42
2.4.3.2	Capacité thermique massique	43
2.4.3.3	Diffusivité thermique	43
2.5	Bilan du chapitre	44
3	Étude de l'humidité du sol sous l'influence de la pluie	45
3.1	Contexte et objectifs	45
3.2	Dispositif expérimental	46
3.2.1	Cahier des charges	46
3.2.2	Géométrie du dispositif	47
3.2.3	Régulation du simulateur de pluie	49
3.2.4	Instrumentation	50
3.3	Définition des profils de précipitation de pluie	55
3.3.1	Mesure de la précipitation in-situ	56
3.3.2	Caractérisation des conditions pluviométriques locales	57
3.3.3	Définition des profils de pluie	60
3.4	Étude expérimentale	62
3.4.1	Campagne d'essais avec un sol uniforme	62
3.4.2	Campagne d'essais avec un sol multicouche	70
3.5	Bilan du chapitre	77
4	Étude des propriétés thermo-physiques du sol sous l'influence de l'état de saturation en eau et de la charge verticale	79
4.1	Contexte et objectifs	79
4.2	La méthode en régime périodique	83
4.3	Dispositif expérimental	85
4.4	Instrumentation du dispositif expérimental	86
4.5	Méthode pour identifier la diffusivité thermique d'un sol poreux	92
4.5.1	Modélisation des échanges thermiques	93
4.5.2	Validation de la méthode pour identifier la diffusivité thermique	98

4.5.2.1	Mesure avec l'appareil KD2Pro	98
4.5.2.2	Identification de la diffusivité thermique	100
4.6	Étude de la charge verticale sur la diffusivité thermique d'un sol	102
4.6.1	Cas du sable fin à l'état sec et saturée en eau	102
4.6.2	Cas de l'argile à l'état sec et saturée en eau	103
4.6.3	Conclusion	104
4.7	Bilan du chapitre	104
5	Étude des performances énergétiques d'un échangeur de surface	107
5.1	Contexte et objectifs	107
5.2	Modélisation numérique d'un échangeur air-sol	109
5.2.1	Principe de l'algorithme de modélisation	110
5.2.2	Modélisation du champ de température du sol	111
5.2.3	Modélisation de la température de l'air circulant dans un échangeur air-sol	113
5.3	Validation expérimentale de la modélisation numérique	117
5.4	Étude des performances énergétiques d'un échangeur air-sol sous l'influence de différentes conditions climatiques et géologiques	125
5.4.1	Étude de l'influence du type et de l'humidité d'un sol	125
5.4.2	Étude de l'influence d'un événement pluvieux	128
5.5	Bilan du chapitre	133
	Conclusion générale et perspectives	135
	Nomenclature	139
	Bibliographie	141
	Annexe A : Enjeux environnementaux et énergétiques	151
	Annexe B : Résultats expérimentaux du profil vertical de la teneur en eaux soumis à des événements pluvieux	153
	Annexe C : Méthode de détermination des grandeurs caractéristiques d'un profil de pluie	161
	Annexe D : Reconstitution du remblai et du gravier in-situ	163
	Annexe E : Principe de la modélisation d'un échangeur air-sol	165

Liste des figures

1.1	Les ressources mondiales de géothermie. Source : BRGM.	3
1.2	Les ressources géothermiques en France. Source : BRGM.	5
1.3	Centrale électrique de Soultz-sous-forêts.	6
1.4	Schéma d'un captage vertical.	7
1.5	Exemple de l'incorporation du réseau du captage dans le ferrailage des fondations.	7
1.6	Représentations des deux systèmes de captage sur nappe phréatique. À gauche : système à deux forages. À droite : système à un forage.	8
1.7	Schéma de principe d'un captage horizontal.	9
1.8	Corbeille géothermique. Source : BRGM.	10
1.9	Schéma de principe du fonctionnement d'un échangeur air-sol.	10
1.10	Température du sol à différentes profondeurs.	11
1.11	Carte du Rhin Supérieur.	12
1.12	Présentation de l'emplacement de l'échangeur air-sol expérimental en pointillé sur la plateforme.	13
1.13	Installation de l'échangeur air-sol sur son lit de pose.	14
1.14	Schéma de la vue de dessus de l'échangeur air-sol expérimental avec la position des trois coupes verticales instrumentées. Les positions des capteurs sont détaillées sur la figure 1.15.	15
1.15	Exemple de l'instrumentation d'un coupe verticale, illustré par la coupe A-A (coupe n°2), avec le détail du positionnement des capteurs de température et d'humidité. Les unités sont en mètre. La distance Z_p varie en fonction de l'emplacement de la coupe, voir le tableau 1.5.	16
1.16	Instrumentation de la plateforme. De haut en bas : positionnement des capteurs sur une coupe verticale ; positionnement du capteur de température et de l'humidité de l'air en sortie de l'échangeur air-sol expérimental ; raccordement des capteurs sur la centrale d'acquisition Keithley 3706A.	17
1.17	Application développée sous <i>LabVIEW</i> pour l'enregistrement et la visualisation des données de mesures. Les pastilles de couleur grise indiquent la position des capteurs sur le site. Les pastilles à coté des baromètres permettent de visualiser la mesure sur le graphique en bas de l'image.	19
2.1	Schématisation des états possibles d'un sol.	22
2.2	Représentation du sol par volumes.	22
2.3	Représentation en masses du sol.	23

2.4	Classification des sols par le département d’agriculture des États-Unis (USDA).	24
2.5	Décomposition du problème thermique en deux processus élémentaires [Dun82].	28
2.6	Schéma de principe pour la formulation analytique de l’échange diffusif cylindrique air-sol. À gauche : coupe perpendiculaire. À droite : coupe longitudinale [Hol02].	29
2.7	Schématique des échanges sensibles P_{lat} , latents P_{lat} , diffusifs P_{diff} et convectifs P_{conv} au niveau du segment du tube [Hol02].	29
2.8	Schéma du modèle de température du sol non perturbé [Thi08].	30
2.9	Schéma du maillage (échelle non respectée) vue de face (haut) et vue latérale (bas) de la modélisation d’un échangeur air-sol [Thi08].	31
2.10	Relevés hebdomadaires d’humidité dans le sol [Phi10].	33
2.11	Superposition de trois processus thermiques élémentaires [Dun82].	34
2.12	Représentation du modèle numérique 2D par Dunand [Dun82].	35
2.13	Conditions aux limites pour la simulation des transferts de chaleur et hydrique le long d’un échangeur horizontal [Gan14].	37
2.14	Représentation graphique de la conductivité thermique de différents sols en fonction de la teneur en eau [Hol02].	43
3.1	Propositions de solutions pour la mesure de la teneur en eau dans le sol. Approche locale (1) : mesure avec des capteurs d’humidité du sol. Approche globale (2) : mesure de la quantité d’eau dans le sol.	47
3.2	Perspective isométrique du dispositif expérimental avec ses plans techniques (voir figure 3.3).	48
3.3	Plans techniques du dispositif expérimental.	49
3.4	Présentation du dispositif expérimental avec le simulateur de pluie et le positionnement des capteurs d’humidité du sol par niveaux (N).	50
3.5	Présentation du dispositif expérimental avec les principaux éléments : le système d’acquisition des données, le circuit d’eau fermé, les tiroirs délimitent un plan horizontal (niveau) pour le positionnement des capteurs d’humidité du sol.	51
3.6	Illustrations des différentes sondes : (a) SM100, (b) SEN0193 et (c) SEN0114.	52
3.7	Calibration des capteurs d’humidité du sol pour les deux campagnes d’essais.	53
3.8	Calibration du débitmètre.	53
3.9	Capteur de niveau d’eau.	54
3.10	Interface graphique pour piloter l’intensité pluvieuse et acquérir les mesures.	55
3.11	Photo du pluviomètre.	56
3.12	Précipitation journalière sur la plateforme géothermique.	56
3.13	Répartition statistique de la précipitation journalière entre août 2013 et février 2017.	57

3.14	Représentation graphique de la courbe Intensité-Durée-Fréquence obtenue à partir des données de la station météo de Strasbourg-Entzheim entre 2006 et 2016.	59
3.15	Courbe IDF ajustée aux données de précipitations journalières in-situ.	60
3.16	Présentation des trois profils de pluie (rectangle, triangle et double triangle) pour un même volume de pluie.	61
3.17	Photo du dispositif expérimental avec un sol composé uniquement de sable 0-5 mm.	62
3.18	Position des capteurs d'humidité du sol pour la première campagne d'essais.	63
3.19	Phénomène de corrosion du capteur SEN0114.	64
3.20	Modélisation et caractérisation du profil trapézoïdal de teneur en eau en fonction du temps.	65
3.21	Modélisation du profil de teneur en eau en fonction du temps pour la première campagne d'essais.	66
3.22	Représentation graphique de la durée d'apparition de l'événement pluvieux $t_{initiale}$, de la durée de début t_{max1} et de fin t_{max2} de l'état stationnaire du régime pluvieux en fonction de la profondeur.	67
3.23	Représentation graphique de la teneur en eau $\omega_{initiale}$ à l'état initial, la teneur en eau ω_{max} de l'état stationnaire du régime pluvieux et de la teneur en eau ω_{finale} au retour en régime permanent en fonction de la profondeur.	68
3.24	Illustration du comportement hydraulique d'un sol soumis à une pluie intermittente.	69
3.25	Granulométrie des différents sols in-situ : terre végétal, remblai, sablon et gravier.	70
3.26	Photo du dispositif expérimental avec un sol multicouche composé par (de haut en bas) : de la terre végétale, du remblai, du sablon, du gravier fond. La position des capteurs d'humidité du sol est annotée.	71
3.27	Modélisation et caractérisation du profil trapézoïdal de teneur en eau en fonction du temps pour la deuxième campagne d'essais.	73
3.28	Représentation graphique de la durée d'apparition de l'événement pluvieux $t_{initiale}$ et de la durée de début t_{max1} de l'état stationnaire du régime pluvieux en fonction de la profondeur.	74
3.29	Représentation graphique de la durée de fin t_{max2} de l'état stationnaire du régime pluvieux et la durée t_{finale} au retour en régime permanent en fonction de la profondeur.	75
3.30	Représentation graphique de la teneur en eau $\omega_{initiale}$ à l'état initial, la teneur en eau ω_{max} de l'état stationnaire en régime pluvieux et de la teneur en eau ω_{finale} en régime permanent en fonction de la profondeur.	76
4.1	Schéma de principe de la méthode de la <i>plaque chaude gardée</i> .	80
4.2	Schéma de principe des méthodes en régime transitoire.	81
4.3	Schéma de principe de la méthode <i>flash</i> .	81

4.4	Schéma de principe de la méthode en <i>régime périodique</i>	81
4.5	Schéma du milieu semi-infini avec une température sinusoïdale imposée à sa surface.	84
4.6	Schéma de principe du dispositif expérimental.	85
4.7	Photo d'un œdomètre et présentation de son principe de fonctionnement : contrainte verticale appliquée sur le piston par des masses.	86
4.8	Présentation de l'œdomètre instrumenté. À gauche : vue en coupe avec l'emplacement des thermocouples. À droite : photo de l'œdomètre avec le système d'acquisition et le générateur de tension.	87
4.9	Exemple de l'étalonnage des thermocouples pour la mesure de la température T_1 , T_3 et T_5	88
4.10	Détermination des caractéristiques de l'onde thermique d'excitation.	89
4.11	Étalonnage du capteur de déplacement linéaire.	89
4.12	Outil pour étalonner le capteur de déplacement linéaire.	90
4.13	Présentation du dispositif avec l'œdomètre instrumenté, le capteur de déplacement, le générateur de tension, le système d'acquisition et l'ordinateur.	91
4.14	Bilan thermique des transferts de chaleur.	92
4.15	Schéma de principe du modèle physique.	94
4.16	Représentation du maillage du dispositif expérimental.	95
4.17	Étude de sensibilité du pas de temps de calcul, de la taille des mailles, l'ordre des mailles et de la forme des mailles.	97
4.18	Principe de la méthode pour identifier la diffusivité thermique d'un échantillon de sol.	98
4.19	Capteurs KD2Pro.	99
4.20	Exemple de la caractérisation d'un échantillon. À gauche : argile à l'état sec. Au centre : appareil de mesure KD2Pro. À droite : argile saturé en eau.	100
4.21	Exemple des températures du sol mesurées ("Mes Ti") et prédites par le modèle numérique ("Num Ti") à l'emplacement de chaque thermocouple faisant suite à l'identification de la diffusivité thermique d'un échantillon.	101
5.1	Schéma de la coupe verticale d'un échangeur air-sol avec les différents types de sols présents.	109
5.2	Schéma vue de dessus de l'échangeur air-sol expérimental avec la position des trois coupes verticales instrumentées. Les positions des capteurs sont détaillées sur la figure 5.1.	110
5.3	Principe de l'algorithme utilisée pour calculer la température de l'air dans un échangeur air-sol.	110
5.4	Schéma des conditions aux limites.	112
5.5	Représentation du maillage du modèle numérique 2D.	113

5.6	Principe de la méthode pour calculer la température de l'air circulant dans l'échangeur.	114
5.7	Étude de sensibilité pour la période de janvier.	116
5.8	Étude de sensibilité pour la période de juillet.	116
5.9	Représentation graphique de la température mesurée (en bleu) et prédite par le modèle (en vert) pour les capteurs T_0, T_1, T_2, T_3 et T_4 de la coupe n°1 (sable).	118
5.10	Représentation graphique de la température mesurée (en bleu) et prédite par le modèle (en vert) pour les capteurs T_0, T_1, T_2, T_3 et T_4 de la coupe n°2 (sable-bentonite).	118
5.11	Représentation graphique de la température mesurée (en bleu) et prédite par le modèle (en vert) pour les capteurs T_0, T_1, T_2, T_3 et T_4 de la coupe n°3 (remblai in-situ).	119
5.12	Répartition statistique de la différence de température entre les mesures et le modèle pour la coupe n°1.	119
5.13	Répartition statistique de la différence de température entre les mesures et le modèle pour la coupe n°2.	120
5.14	Répartition statistique de la différence de température entre les mesures et le modèle pour la coupe n°3.	120
5.15	Modélisation de l'échangeur air-sol expérimental.	122
5.16	Évolution de la température de l'air mesurée T_a (<i>mesures</i>) et prédite par le modèle T_a (<i>modèle</i>) pour le mois de janvier.	122
5.17	Évolution de la température de l'air mesurée T_a (<i>mesures</i>) et prédite par le modèle T_a (<i>modèle</i>) pour le mois de juillet.	123
5.18	Répartition statistique de l'écart de température de l'air entre le modèle et les mesures pour le mois de janvier.	123
5.19	Répartition statistique de l'écart de température de l'air entre le modèle et les mesures pour le mois de juillet.	124
5.20	Caractéristiques de l'échangeur air-sol.	125
5.21	Évolution de la teneur en eau des sols d'enrobage de l'échangeur air-sol expérimental.	126
5.22	Température de l'air en sortie de l'échangeur air-sol pour différentes conditions de précipitation pour le mois de janvier 2014.	130
5.23	Température de l'air en sortie de l'échangeur air-sol pour différentes conditions de précipitation pour le mois de juillet 2014.	130
5.24	Évolution de la puissance différentielle et de la teneur en eau du sol d'enrobage pour le mois de janvier 2014.	131
5.25	Évolution de la puissance différentielle et de la teneur en eau du sol d'enrobage pour le mois de juillet 2014.	132
5.26	Émissions atmosphériques par secteur en France métropolitaine [Pol15].	151

5.27	Bilan énergétique de la France en 2015.	152
5.28	Résultats expérimentaux du 1 ^{er} essai avec un sol uniforme.	153
5.29	Résultats expérimentaux du 2 ^{ème} essai avec un sol uniforme.	154
5.30	Résultats expérimentaux du 3 ^{ème} essai avec un sol uniforme.	154
5.31	Résultats expérimentaux du 4 ^{ème} essai avec un sol uniforme.	155
5.32	Résultats expérimentaux du 5 ^{ème} essai avec un sol uniforme pour le premier événement pluvieux.	155
5.33	Résultats expérimentaux du 6 ^{ème} essai avec un sol uniforme.	156
5.34	Résultats expérimentaux du 1 ^{er} essai avec un sol multicouche.	156
5.35	Résultats expérimentaux du 2 ^{ème} essai avec un sol multicouche.	157
5.36	Résultats expérimentaux du 3 ^{ème} essai avec un sol multicouche.	157
5.37	Résultats expérimentaux du 4 ^{ème} essai avec un sol multicouche.	158
5.38	Résultats expérimentaux du 5 ^{ème} essai avec un sol multicouche.	158
5.39	Résultats expérimentaux du 6 ^{ème} essai avec un sol multicouche.	159
5.40	Résultats expérimentaux du 7 ^{ème} essai avec un sol multicouche.	159
5.41	Détermination des grandeurs caractéristiques du profil "trapézoïdal" de la teneur en eau d'un sol en fonction du temps.	161
5.42	Reconstitution du remblai in-situ à partir des courbes granulométriques du remblai in-situ, du sable 0-4 mm, du gravier 4-8 mm et du gravier 8-16 mm.	164
5.43	Reconstitution du gravier du fond in-situ à partir des courbes granulométriques du gravier du fond in-situ, du sable 0-4 mm, du gravier 4-8 mm et du gravier 8-16 mm.	164
5.44	Schéma de principe de la méthode de modélisation d'un échangeur air-sol.	166

Liste des tableaux

1	Feuille de route du plan <i>Action pour le climat</i>	xiv
1.1	Caractérisation des énergies géothermiques [Sch15].	2
1.2	Puissance des installations géothermiques en France [géo15].	4
1.3	Caractéristiques techniques de l'échangeur air-sol expérimental.	14
1.4	Récapitulatif de la métrologie sur la plateforme géothermique.	16
1.5	Caractéristiques des tronçons de l'échangeur air-sol expérimental et des coupes verticales.	18
2.1	Propriétés thermo-physiques de sols [ISO07].	25
2.2	Récapitulatif de l'impact d'une augmentation de valeur d'un paramètre sur les propriétés thermiques de sols selon différentes références.	42
3.1	Récapitulatif de la métrologie du dispositif expérimental.	52
3.2	Récapitulatif des différents scénarios de précipitation pour la première campagne d'essais.	64
3.3	Récapitulatif des différents scénarios de précipitation de la seconde campagne d'essais.	72
4.1	Récapitulatif des méthodes pour caractériser les propriétés thermo-physiques des matériaux.	82
4.2	Récapitulatif de la métrologie de l'instrumentation de l'oedomètre.	91
4.3	Caractéristiques thermo-physiques des matériaux.	94
4.4	Spécifications des capteurs KD2Pro.	99
4.5	Caractérisation de la diffusivité thermique du sable fin et de l'argile fine à l'état sec et saturés en eau avec l'appareil de mesure KD2Pro.	100
4.6	Identification de la diffusivité thermique du sablon et de l'argile à l'état sec et saturé en eau.	102
4.7	Résultats de l'étude de l'influence de la charge verticale sur la diffusivité ther- mique d'un sable fin.	103
4.8	Résultats de l'étude de l'impact de la charge verticale sur la diffusivité thermique d'une argile fine.	104
5.1	Valeurs de la diffusivité thermique des différents sols.	114
5.2	Valeurs des paramètres de référence utilisées pour l'étude de sensibilité.	115

5.3	Récapitulatif de l'influence de l'incertitude des paramètres sur l'incertitude du modèle numérique de l'échangeur air-sol.	117
5.4	Propriétés thermo-physiques du sol d'enrobage pour différentes configurations. .	127
5.5	Énergie de chauffe pour le mois de janvier 2014.	127
5.6	Énergie de rafraîchissement pour le mois de juillet 2014.	127
5.7	Récapitulatif des différents scénarios de précipitations de pluie.	129
5.8	Propriétés thermo-physiques du sable mesurées en laboratoire.	129
5.9	Énergie échangée entre le sol et l'air.	132

Introduction

L'hypocauste ...

Aussi vieux que l'humanité elle-même, le feu ouvert est assurément le plus ancien mode de chauffage. Tout d'abord, la propagation du feu était empêchée par une délimitation de pierres reposant sur de la terre battue. Ce foyer était disposé au centre de la pièce principale des habitations pour disperser la chaleur à l'intérieur de l'ensemble des pièces.

C'est au XVIII^{ème} siècle avant Jésus-Christ, dans la ville de Mohenjo-daro que l'utilisation du sol comme source de chaleur pour le chauffage des habitats fit son apparition. Des vestiges ont également été retrouvés par les Grecs dès le IV^{ème} siècle av. J-C à Athènes mais aussi à Olympie datant du I^{er} siècle av. J-C. A la même période, les Romains perfectionnèrent ce système pour chauffer leurs bains thermaux et leurs habitats. Ils le nommèrent « hypocauste » [Deg84]. On peut le traduire du latin par « chauffage par-dessous ». Ce système était composé d'une *chambre de chauffe* (local où se situe le foyer appelé aussi *praefurnium*), un *canal de chauffe* (qui dirige la chaleur du foyer vers la chambre de chaleur), une *chambre de chaleur* (sous-sol d'une hauteur moyenne de 60 *cm* située sous le local à chauffer) et de murs creux (destinés à protéger les murs intérieurs d'une pièce contre l'humidité et l'évacuation des gaz).

Le contexte actuel

L'énergie fossile - que ce soit le pétrole, le charbon ou le gaz naturel - est à la base de nos systèmes de chauffage depuis la révolution industrielle de la fin du XVIII^{ème} siècle. Malheureusement, les émissions de gaz produites par ces combustibles sont à l'origine des gaz à effet de serre (**GES**). Depuis sa création en 1988, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (**GIEC**) établit des rapports pour démontrer le lien entre les activités humaines et le réchauffement climatique. Dans son dernier rapport [GIE14], le GIEC est désormais « *certain à 95 % que l'homme est la première cause du réchauffement planétaire actuel* ». Pour ne pas engendrer des répercussions irréversibles pour l'être humain et les écosystèmes, la température moyenne mondiale ne doit pas dépasser le seuil de 2 °C d'augmentation par rapport à l'ère préindustrielle 1861-1880. À l'initiative des Nations Unies, la communauté internationale se rassemble chaque année lors de la **Conférence des parties (COP)** pour débattre des choix gouvernementaux à adopter pour lutter contre le réchauffement climatique. Le premier accord se traduit par la signature du **protocole de Tokyo** en 1997 avec la participation d'une centaine de pays. Ce dernier vise à réduire de 5,2 % les émissions de GES planétaires d'ici 2020. La **COP21**, qui a eu lieu fin 2015 à Paris, a permis d'aboutir à un accord historique engageant 195 pays à réduire leurs émissions de GES. Cet accord a pour objectif de limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C d'ici 2100 [Uni15]. Suite à ces accords internationaux,

l'Union européenne a décidé de mettre en place un plan *Action pour le climat* [eur12] jusqu'en 2050, voir le tableau 1, visant à remplir les objectifs de 1,5 °C de réchauffement. En 2014, l'UE est en bonne voie pour réussir ses objectifs fixés pour 2020 avec une diminution de 23 % de ses émissions totales de GES [Eur15] mais le but fixé de 80 % de réduction pour 2050 est encore loin d'être atteint.

Objectifs	2020	2030	2050
Réduction des émissions de GES	20 %	40 %	80 %
Part d'énergie renouvelable dans la consommation énergétique	20 %	27 %	<i>n.c.</i>
Amélioration de l'efficacité énergétique	20 %	27 %	<i>n.c.</i>

n.c. : non communiqué

Tableau 1 – Feuille de route du plan *Action pour le climat*

Le plan d'action de l'UE

Le plan *Action pour le climat* de l'UE touche tous les secteurs d'activités (productions d'électricité, bâtiments, industries, transports et agricultures) avec des réductions de GES en fonction de leurs potentiels technologiques et économiques. Le secteur de l'électricité représente le plus important potentiel avec une réduction quasi-totale des GES. L'électricité pourrait remplacer les combustibles fossiles dans les transports avec l'arrivée des voitures électriques et hybrides, et dans le secteur du bâtiment avec la construction/rénovation des habitations dites passives (autosuffisance énergétique) ou actives (surplus d'énergie par rapport à l'énergie suffisante). Dans ce dernier secteur, la Commission européenne estime que les réductions d'émissions de GES peuvent diminuer de 90 % d'ici 2050 avec l'utilisation des énergies renouvelables comme source d'énergie.

La géothermie : une source d'énergie pour l'habitat ?

Les filières et les applications de la géothermie concernant les bâtiments sont multiples. Elles vont de l'alimentation en chaud ou/et en froid, en desservant de la maison individuelle aux réseaux de chaleur urbains (milliers de logements). Pour répondre aux besoins énergétiques, une prédiction fiable et réaliste de l'énergie géothermique est essentielle. Par contre, celle-ci dépend fortement des caractéristiques thermo-physiques du sol qui sont elles-mêmes influencées par la teneur en eau (influence de la précipitation de pluie) et de la compacité du sol.

Cette thèse se consacre aux **systèmes géothermiques de surface**. En particulier, l'objectif de ce travail de thèse est d'apporter des connaissances scientifiques sur :

- l'interaction des conditions météorologiques sur la teneur en eau d'un sol ;
- l'influence des conditions de compacité sur les propriétés thermo-physiques d'un sol ;
- l'évaluation de ces conditions sur les performances énergétiques d'un échangeur de surface.

Démarche suivie

L'objectif de ce travail de thèse est l'*étude des conditions géologiques et climatiques sur l'efficacité énergétique des systèmes géothermiques de surface*. Pour ce faire, ce présent travail se répartit en cinq chapitres.

Le **premier chapitre** se consacre à la présentation de la géothermie avec l'introduction des différentes catégories d'énergies, son développement à l'international et en France. Ce chapitre aborde aussi les systèmes de captages géothermiques dédiés au secteur du bâtiment. Enfin, ce chapitre présente la plateforme géothermique implantée à l'Université de Strasbourg qui est à l'origine du sujet de recherche de cette thèse.

Le **deuxième chapitre** introduit les grandeurs caractéristiques des échanges thermiques dans le sol, des propriétés thermo-physiques d'un sol et de la modélisation d'un sol granulaire. De plus, ce chapitre dresse un état de l'art des modèles analytiques et numériques basés sur les systèmes géothermiques de surface. Ce dernier est amélioré avec une étude bibliographique orientée sur les facteurs impactant sur les performances énergétiques des échangeurs air-sol et qui porte sur :

- les paramètres géométriques et de dispositions des échangeurs ;
- les conditions climatiques et environnementales ;
- les propriétés thermo-physiques du sol.

Le **troisième chapitre** présente l'étude de la précipitation de la pluie sur l'humidité du sol avec l'élaboration, la conception, l'instrumentation et la validation d'un dispositif expérimental. Ce dispositif permet de simuler des conditions météorologiques et de mesurer l'humidité du sol tous les 20 *cm* sur une profondeur de l'ordre du mètre.

Le **quatrième chapitre** se consacre à l'étude des propriétés thermo-physiques d'un sol poreux sous l'influence du type de sol, de l'état de saturation en eau et de la charge verticale. Une méthode est développée et validée pour identifier la diffusivité thermique d'un sol poreux. En appliquant différents états de saturations et différentes charges, les impacts de ces deux facteurs sur la diffusivité thermique d'un sol poreux sont ainsi mis en évidence.

Le **dernier chapitre** propose une modélisation d'un échangeur air-sol afin de prendre en compte les résultats expérimentaux du chapitre 3 et 4. L'intérêt de cette modélisation est de quantifier l'énergie échangée entre le sol et l'air circulant dans l'échangeur. À partir de cette modélisation, deux études numériques avec différentes conditions météorologiques, types de sol et d'humidité de sol évaluent leurs influences sur les performances énergétiques d'un échangeurs air-sol.

Contexte de l'étude

1.1 Introduction

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique, les enjeux environnementaux et énergétiques (voir l'annexe A page 151 pour plus de détails) impliquent la recherche de moyens afin d'amoinrir nos impacts, notamment dans le secteur du bâtiment. Ces moyens peuvent être répartis en deux groupes : la réduction des besoins énergétiques (via les normes thermiques réglementaires) et la production d'énergie par des systèmes à énergie renouvelable (**EnR**).

La RT2012, applicable depuis le 1^{er} janvier 2013, repose sur le principe de la construction *bioclimatique*. Ce concept met en œuvre la construction d'un bâtiment en fonction de son environnement pour réduire ses besoins en énergie. Le bâtiment est construit de manière à récupérer un maximum d'énergie en hiver, comme par exemple, orienter les vitres au Sud, et en été réduire les apports solaires en utilisant par exemple des protections solaires.

En terme de production d'énergie, l'émergence des systèmes à EnR est en plein développement depuis une vingtaine d'années en France. Les différentes sources d'énergie (hydroélectricité, éolien, solaire, biomasse et géothermie) y sont toutes aussi bien exploitées. Pour des raisons évidentes liées à ce sujet de thèse, seulement les systèmes géothermiques dédiés aux bâtiments (que ce soit aux logements collectifs ou à la maison individuelle) sont présentés dans la partie 1.2. De plus, l'Université de Strasbourg dispose d'une plateforme géothermique pour améliorer la compréhension des échanges de chaleur dans le sol liés aux conditions climatiques et géologiques. Cette plateforme est présentée dans la partie 1.3.

En résumé, ce premier chapitre vise à poser précisément le contexte environnemental, énergétique, expérimental avec les objectifs suivants :

- définir l'énergie géothermique et présenter son développement dans notre société ;
- positionner la place de la géothermie de surface dans la production d'énergie renouvelable dans le secteur du bâtiment ;
- décrire la plateforme géothermique implantée et instrumentée à l'Université de Strasbourg.

1.2 La géothermie

Le recours aux EnR semble être une solution incontournable pour remplacer les ressources primaires émettrices de GES (charbon, pétrole brut et produit pétrolier raffiné et le gaz naturel). Dans ce contexte, l'énergie géothermique répond aux besoins environnementaux et énergétiques actuels. Cette partie se consacre à présenter les différentes technologies disponibles sur le marché pour produire de l'énergie dans le secteur du bâtiment.

1.2.1 Définition

La géothermie se compose du terme *géo* - la Terre - et de *thermie* - la Chaleur, traduit littéralement par « chaleur de la terre ». C'est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et la technique visant à l'exploiter. La chaleur terrestre a suscité des interrogations concernant son origine. Deux grandes hypothèses [Lem08] la décrivent : la dissipation de l'énergie dite primaire lors de la formation de la Terre, il y a 4,5 milliards d'années (d'après Leinbitz en 1700) et la désintégration des éléments radioactifs.

L'exploitation de cette source d'énergie est double : production de chaleur et d'électricité. La première est utilisée depuis longtemps dans les régions volcaniques du fait de l'existence des sources chaudes. En tant que production de chauffage urbain, le premier réseau fût installé en 1930 à Reykjavik (Islande). Quant à la production de l'électricité géothermique, elle est apparue pour la première fois en 1904 dans la ville de Larderello en Italie [Fer98].

Type de géothermie	Caractéristiques du réservoir		Utilisations
	Température (T)	Profondeur (p)	
Très basse énergie	$T < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	$p < 100\text{ }m$	Chauffage et rafraîchissement de locales avec une PAC
Basse énergie	$30 < T < 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	$p < 1\ 500\text{ }m$	Chauffage urbain industrielles, thermales balnéothérapie
Haute énergie	$150 < T < 350\text{ }^{\circ}\text{C}$	$p > 2\ 000\text{ }m$	Production d'électricité et de chaleur

Tableau 1.1 – Caractérisation des énergies géothermiques [Sch15].

Le type d'énergie produite par la géothermie peut être classifié en trois grandes catégories (voir le tableau 1.1) dépendantes de la profondeur de forage et de la température du réservoir. Cette classification est usuellement utilisée lorsque l'on souhaite avoir une vue

globale des ressources géothermiques sur la Terre. Les hautes énergies peuvent atteindre des puissances de l'ordre du dizaine de MW et répondent à des demandes de production de chaleur et d'électricité à grande échelle (village, quartier et ville). Les très basses énergies concernent uniquement les productions de chaleur et s'adaptent très bien aux besoins énergétiques de la maison individuelle (quelques dizaines de kW) à un écoquartier (centaines de kW). Selon cette classification, les énergies exploitées par les systèmes **géothermiques de surface** correspondent à la géothermie de **très basse énergie**. Les différents types de technologies pour extraire la chaleur du sol sont présentés dans la partie 1.2.3.

1.2.2 Développement de la géothermie

La géothermie dans le monde

Les ressources géothermiques dans le monde sont très répandues, voir la figure 1.1, et s'adressent aux deux grandes filières : la production d'électricité et la production de chaleur. La ressource s'élève en moyenne à $0,09 W.m^{-2}$ et pourrait répondre au besoin de la production mondiale à elle seule [Sch15].

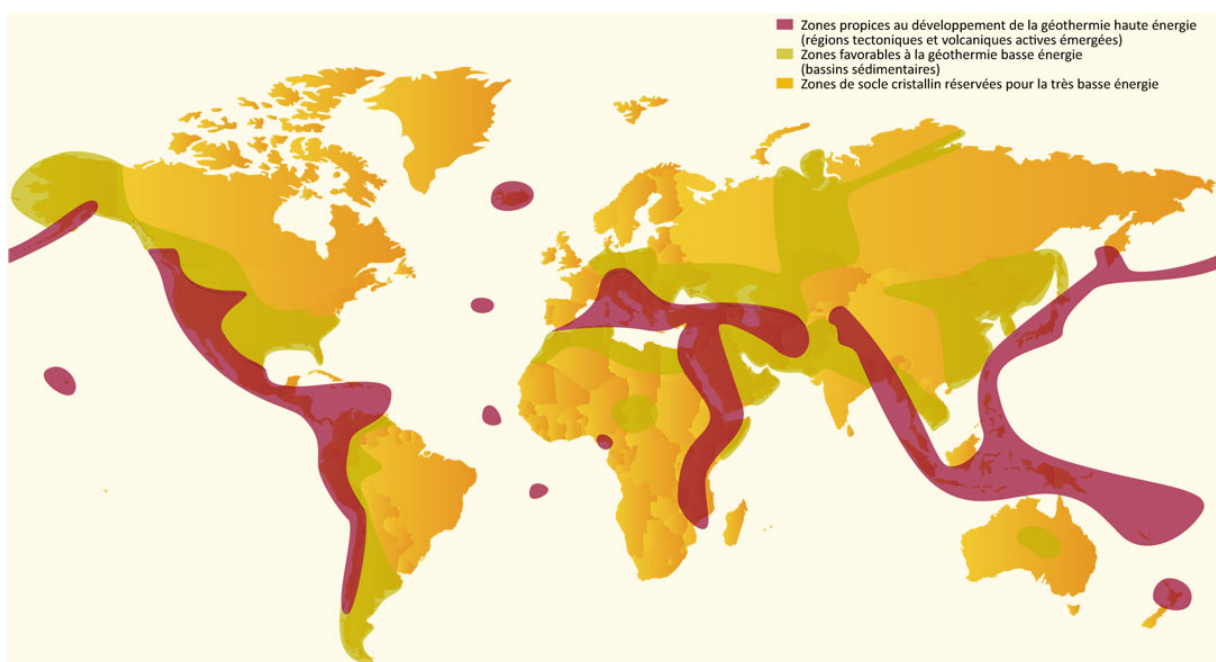


Figure 1.1 – Les ressources mondiales de géothermie. Source : BRGM.

La production d'électricité à partir de la géothermie est disponible dans plus de 20 pays avec une production totale de $77,4 TW_e h$ en 2014 [Ber15]. Parmi eux, l'Indonésie possède le plus grand potentiel avec $27 GW$ soit 40 % des ressources mondiales¹. Quant

1. Arnaud Guiguitant, « L'Indonésie mise sur l'électricité géothermique », *Le Monde* du 25-10-2009.

à l'Islande, sa production géothermique représente 30 % de sa production totale. Depuis 1995, la production d'électricité a quasiment doublé.

La production directe de la géothermie en terme de chaleur est disponible dans 82 pays avec une production totale en 2015 de 163,3 TW_{th} [LB15]. La Chine remporte haut la main le classement des pays les plus producteurs d'énergie géothermique avec l'exploitation de 12 réservoirs géothermiques.

En considérant la production mondiale d'énergie, l'énergie géothermique représente seulement 0,9 % par rapport à la totalité produite estimée à 13306 Mt_{ep} , d'après l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE).

La géothermie en France

Les recherches pétrolières menées en France à partir de 1950 ont abouti à des informations sur le sous-sol des bassins sédimentaires tant sur le plan structural, grâce aux campagnes sismiques, que sur le plan stratigraphique, à l'aide de près de 5 000 forages. La géothermie en France s'est développée en grande partie avec l'accès à cette documentation. Dès 1974, l'inventaire de ces renseignements identifie les ressources géothermiques et quantifie une énergie potentielle à extraire de 6 Mt_{ep} annuelle pendant trente ans [Lav77].

Les ressources géothermiques en France sont essentiellement de type *basse énergie* dans les formations aquifères profondes et de type *haute énergie* dans les départements d'outre-mer. Elles sont représentées par la figure 1.2. Elles se situent principalement dans trois régions géographiques (le bassin parisien, le bassin aquitain et la plaine d'Alsace) mais aussi dans d'autres bassins tels que la Limagne, la Bresse, le Couloir rhodanien, le Roussillon et le Hainaut. Chacun de ces bassins peuvent constituer des cibles géothermiques dans les gammes de températures pouvant parfois aller jusqu'à 100 °C.

L'énergie géothermique en France est principalement exploitée sous la forme de chaleur (424 kt_{ep}) produite notamment en Île-de-France et en Aquitaine. La production d'électricité issue de la géothermie (7 kt_{ep}) se concentre en revanche en Guadeloupe et sur le site de Soultz-sous-Forêts en Alsace.

Type de géothermie		2015	
		MW_{th}	$kt_{ep}.an^{-1}$
Très basse énergie	Secteur particulier	1 780	230
	Secteur collectif	500	87
	Total	2 280	317
Basse énergie		377	107
Haute énergie		24	8
Total		2 681	424

Tableau 1.2 – Puissance des installations géothermiques en France [gé015].

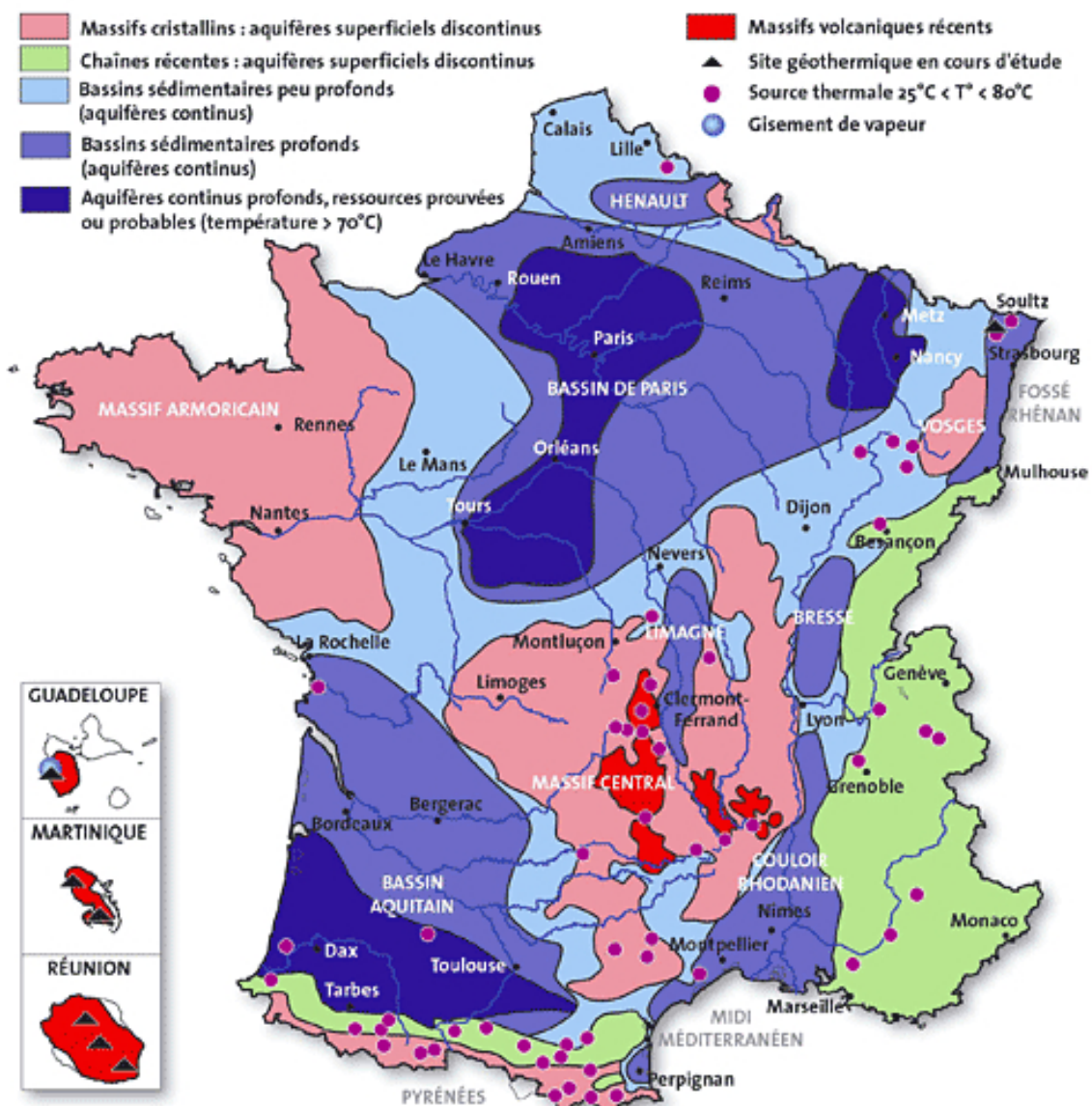


Figure 1.2 – Les ressources géothermiques en France. Source : BRGM.

Le cas particulier de l'Alsace

En Alsace, la plaine du Rhin se situe dans un fossé d'effondrement appelé le fossé rhénan. Il s'est rempli de dépôts tertiaires et quaternaires pouvant atteindre par endroits plusieurs kilomètres d'épaisseur. Il possède le gradient le plus élevé de France pouvant atteindre jusqu'à $10\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$.

La recherche de son exploitation à grande profondeur débute en 1987 avec la création du site géothermique de Soultz-sous-Forêts (voir figure 1.3) et aboutit le 13 juin 2008 par l'inauguration d'une centrale électrique de $1,8\text{ MW}_e$ pour une utilisation industrielle. Le site comprend 4 forages à grandes profondeurs (un à $3\,600\text{ m}$ et trois autres à $5\,100\text{ m}$). Le réservoir exploité est en fait de la saumure à une température entre 140 et $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Dans le même élan, en juin 2016, la centrale de Rittershoffen permet une production

thermique de 24 MW. Elle a pour objectif de fournir de la chaleur à une usine. Deux forages constitués de doublet profond de 2 500 et 2 600 m puisent de l'eau à 170 °C.



Figure 1.3 – Centrale électrique de Soutz-sous-forêts.

1.2.3 Les systèmes géothermiques de surface

Les besoins énergétiques d'une maison individuelle ou de logements collectifs peuvent être fournis par les systèmes géothermiques de surface. L'objectif fixé par ce travail de thèse est d'améliorer les connaissances scientifiques sur l'interaction thermique atmosphère/sol/échangeur. Il semble intéressant de présenter les technologies concernées par ce sujet. Pour la même raison, seulement les types de captages sont présentés et non les systèmes visant à exploiter la chaleur extraite comme les Pompes à Chaleur (PAC) ou les systèmes à détente directe. Les informations renseignées dans cette partie sont issues des ouvrages suivants : [Lem08 ; ADE08 ; Ri10 ; Her10 ; LL10a ; LL10b ; Per11 ; Col11].

Le captage vertical

Le principe du *captage vertical*, figure 1.4, est d'échanger de l'énergie avec le sol à l'aide d'une sonde (généralement un tube en U ou double U en polyéthylène) sur une profondeur allant de 30 à 100 m de profondeur. À partir de 10 m, la température du sol est pratiquement constante toute l'année, et permet ainsi d'obtenir une source d'énergie non-dépendante des conditions météorologiques et saisonnières. La puissance linéique de ces capteurs est d'environ $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$.

Cependant, l'énergie extraite varie en fonction de plusieurs paramètres :

- de la température atteinte par le sous-sol car le gradient de température est très variable d'une région à une autre ;
- des caractéristiques thermiques du sous-sol ;
- du type de la sonde.

L'avantage de ce captage est une surface au sol restreinte. En effet, 10 à 15 m² de terrain est suffisante pour installer la foreuse et pour réaliser l'ouvrage. Par contre, un risque important est l'appauvrissement thermique en cas de sur-utilisation en hiver et/ou de sous-utilisation du rechargement thermique du sous-sol en été.

Dans le cas où un bâtiment nécessite des pieux de fondations pour assurer sa stabilité mécanique, il existe la technologie des *fondations thermoactives* ou *géothermiques*. Elle consiste à intégrer un système de captage dans les éléments de fondations, voir la figure 1.5. Ce captage est constitué d'un réseau de tubes en polyéthylène dans lequel circule, en circuit fermé, un fluide caloporteur. L'intérêt est de s'affranchir des travaux de forage et de pose nécessaires pour les sondes géothermiques.

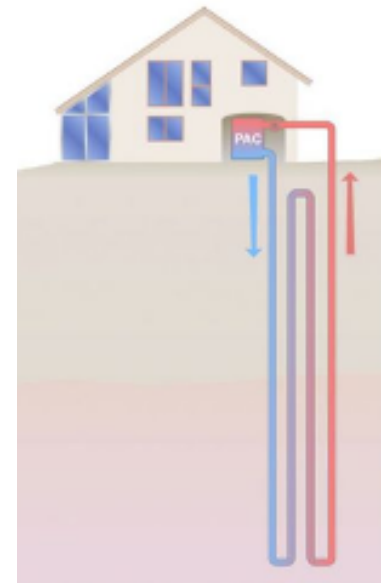


Figure 1.4 – Schéma d'un captage vertical.



Figure 1.5 – Exemple de l'incorporation du réseau du captage dans le ferrailage des fondations.

Le captage sur nappe phréatique

Le système de *captage sur nappe phréatique* consiste à récupérer l'énergie contenue dans l'eau, voir la figure 1.6. Le premier forage puise de l'eau à l'aide d'une pompe immergée. L'eau est ensuite refroidie par une PAC. L'emplacement du rejet de l'eau est défini par la topologie du forage :

- **système à deux forages** : l'eau est rejetée dans un second forage. D'un point de vue environnemental, rejeter dans la nappe phréatique d'origine est la solution la plus satisfaisante car elle évite le gaspillage ;
- **système à un forage** : l'eau rejetée se situe dans une rivière, un plan d'eau ou un réseau d'eaux pluviales.

La distance minimale à respecter entre deux forages est de 15 m afin d'éviter une interférence thermique et hydraulique tout en tenant compte de l'écoulement naturel de la nappe d'eau souterraine.

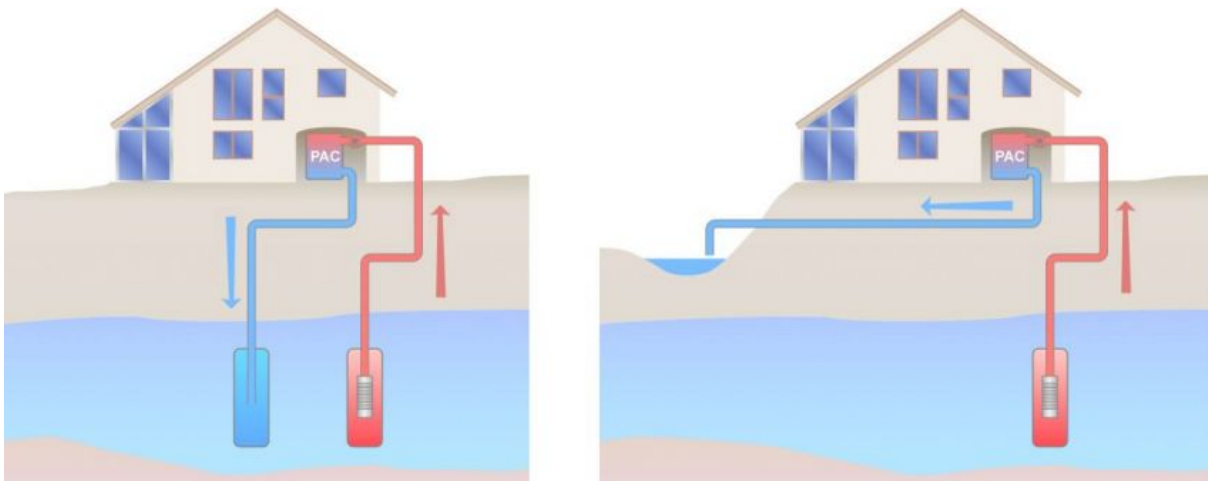


Figure 1.6 – Représentations des deux systèmes de captage sur nappe phréatique. À gauche : système à deux forages. À droite : système à un forage.

L'extraction de l'énergie dans l'eau existe aussi pour les eaux usées (*eaux grises*) [Tho08]. L'énergie est récupérée au moyen d'un échangeur de chaleur intégré dans les réseaux d'assainissement. Cette technologie peut s'appliquer dans les *bâtiments* avec de grandes quantités de circulation d'eau (hôpitaux, piscines, blanchisseries, ...), dans de grands *collecteurs* et dans des *stations d'épuration* après traitement de l'eau. Cette technologie connaît un franc succès en Suisse, Allemagne, Autriche et Norvège.

Le captage horizontal

Le *captage horizontal* exploite la chaleur géothermique à une profondeur de 60 à 120 *cm*. L'énergie est extraite par un réseau de tubes en polyéthylène positionné sur un plan horizontal, voir la figure 1.7. L'énergie extraite est généralement apportée par les conditions climatiques (soleil, pluie, vent) d'où son appellation usuelle de *capteur géosolaire*. Le réseau des tubes est réalisé soit en série soit en parallèle (limitant les pertes de charge). La puissance linéique peut varier de 10 à 15 $W.m^{-1}$ selon l'exposition au soleil, la précipitation de pluie et les caractéristiques thermiques du sol.

L'avantage de ce système est un coût de construction très faible par rapport au captage vertical. Cependant, ses performances énergétiques sont très variables en fonction des conditions climatiques et en hiver le gel autour des tubes peut générer des déformations de terrain.



Figure 1.7 – Schéma de principe d'un captage horizontal.

Une variante des capteurs horizontaux est le *capteur Slinky*. Il se compose d'un tuyau en polyéthylène positionné en spirale sur un plan horizontal. L'avantage de ces capteurs est une capacité de captage plus importante par rapport à un captage horizontal classique.

Corbeilles géothermiques

Les *corbeilles géothermiques*, figure 1.8, sont une technologie intermédiaire entre le captage vertical et horizontal. Elles sont constituées d'un enroulement de tubes en polyéthylène qui sont fixés sur une structure cylindrique ou conique. La profondeur d'enfouissement se situe entre 2 et 4 *m* de manière à ce qu'elles soient situées dans une zone de terrain hors-gel. Leurs diamètres sont de l'ordre du mètre pour des longueurs de tubes de

50 m à 300 m. L'avantage de ce système par rapport aux capteurs horizontaux classiques est de nécessiter 40 % de moins de surface au sol pour une même puissance prélevée.



Figure 1.8 – Corbeille géothermique. Source : BRGM.

L'échangeur air-sol

L'échangeur air-sol est un système géothermique de surface. Il préchauffe (*puits canadien*) ou refroidit (*puits provençal*) l'air circulant dans un conduit enterré à une profondeur de 1 à 3 m grâce à l'inertie thermique (en amortissement et en déphasage) du sous-sol (voir le schéma de principe de la figure 1.9). La mise en œuvre de ce système demande peu d'investissement financier : coût du matériel et coût de l'enfouissement de l'échangeur. L'étanchéité de l'échangeur doit être totale pour prévenir des risques de radon. Depuis l'application de la RT2012 imposant des conditions strictes de l'étanchéité à l'air [log12], ce système répond aux besoins de ventilation des nouvelles constructions.

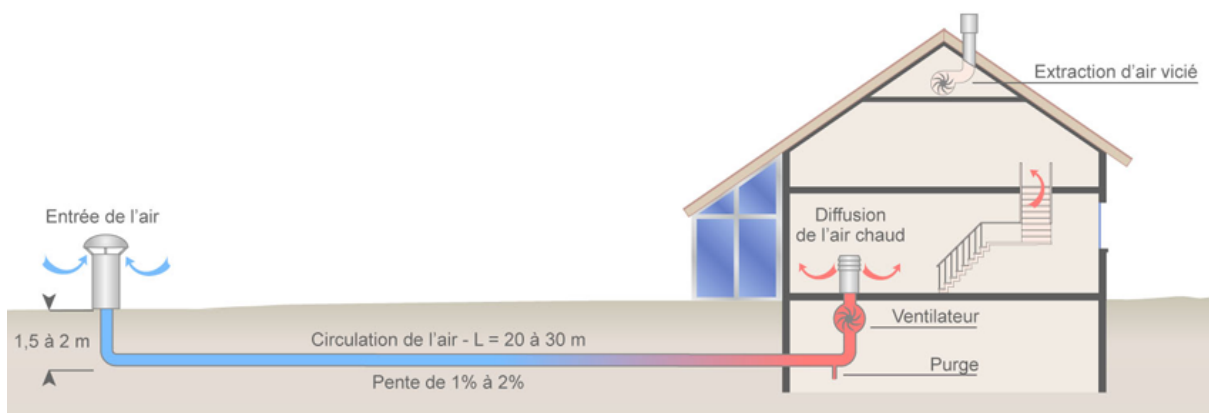


Figure 1.9 – Schéma de principe du fonctionnement d'un échangeur air-sol.

Son rôle diffère selon la période de l'année. En **hiver**, l'air extérieur est réchauffé par le sol. Les besoins de chauffage liés au renouvellement d'air d'un bâtiment sont réduits. De

plus, il assure le maintien du bâtiment en hors-gel. En **été**, le renouvellement d'air profite de la fraîcheur du sol et l'habitation bénéficie d'un rafraîchissement naturel et "gratuit". À l'**intersaison**, l'utilisation d'un système de by-pass est préconisé pour "court-circuiter" l'échangeur lorsque les températures de confort sont atteintes.

L'utilisation de l'échangeur air-sol est pertinente pour les climats contrastés avec une différence de température importante entre l'été et l'hiver : les pics de températures sont lissés grâce à l'amortissement thermique du sol. A 5 m de profondeur la température du sol est quasiment constante au cours de l'année (voir la figure 1.10). Les variations de températures journalières influencent la température du sol jusqu'à 60 cm de profondeur tandis que celles annuelles peuvent atteindre une dizaine de mètres avec un déphasage de 2 mois.

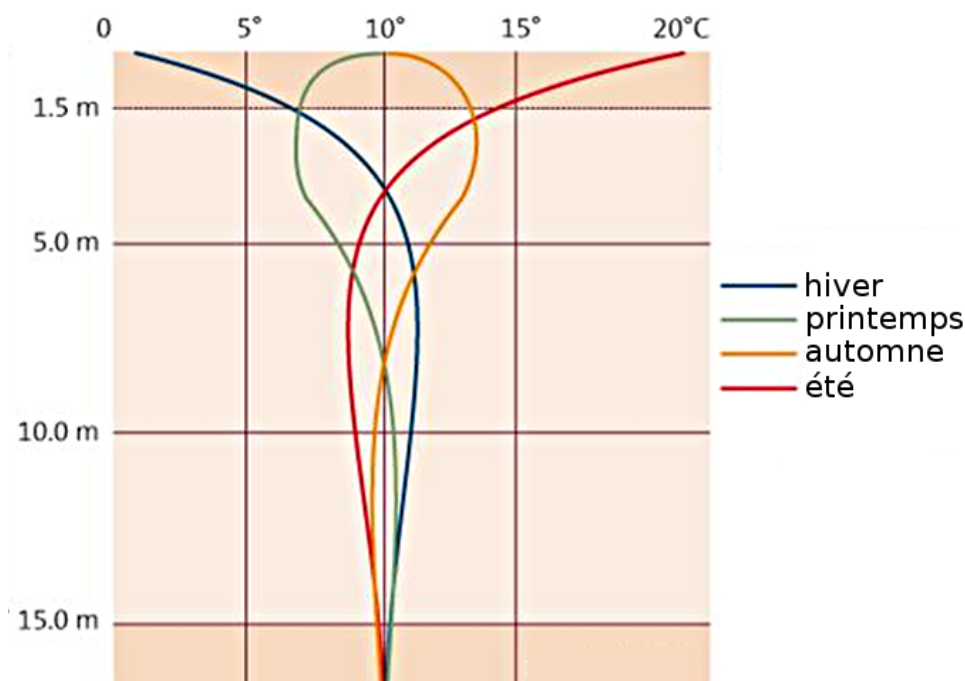


Figure 1.10 – Température du sol à différentes profondeurs.

Les échangeurs air-sol sont utilisés principalement dans deux secteurs : le bâtiment et les serres agricoles. Avec le recensement de 30 projets expérimentaux dans des conditions climatiques différentes (climat froid, tempéré et chaud), les économies d'énergie par ce système sont réelles [San95]. Techniquement, il est possible de raccorder un échangeur air-sol à une large panoplie de constructions (bureau, commerce, production, maison, université) pour une superficie variant de 30 à 16 000 m².

1.3 La plateforme géothermique à l'Université de Strasbourg

Dans le cadre du projet européen INTERREG IV TEM³, l'université de Strasbourg a réalisé une plateforme géothermique à l'IUT de Robert Schuman, à Illkirch-Graffenstaden. Cette plateforme vise à étudier les transferts thermiques dans le sol à très faible profondeur et se compose de deux échangeurs air-sol ainsi qu'un échangeur eau-sol. La plateforme est instrumentée par des capteurs de température et d'humidité. Ceux-ci sont positionnés dans le sol autour des échangeurs et à l'intérieur des conduits.

1.3.1 Le projet TEM³

La construction de la plateforme géothermique à l'Université de Strasbourg est réalisée dans le cadre du projet TEM³ du programme INTERREG IV Rhin Supérieur. Les programmes INTERREG [INT] ont été initiés en 1989 par l'Union européenne afin de soutenir la coopération transfrontalière avec une aide financière provenant des Fonds Européen de Développement Régional (FEDER).

Géographiquement, le programme s'étend sur les trois régions du Rhin Supérieur (voir figure 1.11) comprenant le Palatinat du Sud, une partie du Pays de Bade, l'Alsace et les cinq cantons de la Suisse du Nord-Ouest.

Les thématiques de ce programme sont :

- d'utiliser le potentiel économique de l'espace du Rhin supérieur en commun grâce à des projets dans les domaines de la recherche et de l'innovation, de l'entreprise et de l'économie ou du tourisme ;
- de faire de l'espace du Rhin supérieur une région intégrée en matière de formation, de travail et d'habitat, en soutenant des actions en faveur de la formation et de l'emploi, de l'éducation et du bilinguisme, de la préservation du patrimoine et de la culture, de la santé et du social, des services publics, mais aussi de la rencontre entre citoyens ;
- d'assurer un développement durable de l'espace du Rhin supérieur par le cofinancement d'initiatives dans les domaines de la protection de l'environnement, des énergies renouvelables, de l'efficacité énergétique et des transports.



Figure 1.11 – Carte du Rhin Supérieur.

Le projet TEM³ est un des projets du programme INTERREG IV Rhin Supérieur. Le consortium du projet TEM³ est composé de l'IUT Robert Schuman de l'Université de Strasbourg, l'INSA de Strasbourg, la Hochschule Karlsruhe (Allemagne) et la Fachhochschule Nordwestschweiz (Suisse). La plateforme géothermique (trois échangeurs enterrés avec récupération de chaleur à l'aide d'une ventilation motorisée contrôlée à double flux et un échangeur eau-air) construite à l'IUT Robert Schuman fait partie des équipements financés par ce projet.

La plateforme répond à la fois à des problématiques pédagogiques et de recherche :

- l'**enseignement** : plateforme de formation énergétique pour différents niveaux d'étudiants (Licence Pro, DUT, Master) ;
- la **formation professionnelle** : organisation de séminaires afin d'apporter des techniques d'installation aux professionnels (Maîtres d'œuvre, Maîtres d'ouvrage, Artisans) ;
- la **recherche** : caractérisation des transferts thermiques dans le sol et l'influence de la nature de l'enrobage sur l'efficacité thermique d'un échangeur air-sol.



Figure 1.12 – Présentation de l'emplacement de l'échangeur air-sol expérimental en pointillé sur la plateforme.

1.3.2 Présentation de la plateforme géothermique

La plateforme géothermique comporte trois types d'échangeurs enterrés. Parmi ces trois échangeurs, deux sont consacrés à la formation *pédagogique*, et le troisième est dédié à la *recherche*, voir les figures 1.12 et 1.13.

Les caractéristiques techniques et géométriques du tube de l'échangeur air-sol expérimental sont détaillées dans le tableau 1.3. Sa conception et son dimensionnement sont basés à partir des règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 [Gre15] pour **satisfaire** les besoins en renouvellement d'air d'une **maison individuelle** de $200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. L'échangeur possède une prise d'air extérieur en acier galvanisé avec un filtre pour s'opposer à l'introduction de corps étranger (papiers, feuilles, animaux). Son tube est annelé à l'extérieur mais lisse à l'intérieur pour limiter le développement microbien lié à une stagnation de l'eau. Pour cette même raison, le tube requiert et possède une pente de 2 %. L'évacuation des condensats est assurée par un regard de diamètre de 300 mm installé au point le plus bas du système.



Figure 1.13 – Installation de l'échangeur air-sol sur son lit de pose.

Caractéristiques		Échangeur air-sol expérimental
Tube	type	Polyéthylène qualité alimentaire
	fluide	air
	rigidité	rigide
	diamètre extérieur	200 mm
	longueur	30 m
	pente	2 %
	profondeur	0,70 à 1,30 m
Remblai	lit de pose	15 cm de sable compacté
	enrobage	différentes compositions *

* : 3 types de sols :

sable, mélange de sable et bentonite (3 %), argile in-situ.

Tableau 1.3 – Caractéristiques techniques de l'échangeur air-sol expérimental.

L'échangeur air-sol est **novateur** car il possède trois types de sols pour l'enrobage :

- du *sable* : le type de sol conseillé pour l'installation d'un échangeur air-sol ;
- un mélange entre du *sable et de la bentonite* (4 %) : la particularité de la bentonite est d'absorber et de retenir l'eau contenue dans le sol ;
- de l'argile in-situ : celui-ci sert de référentiel.

La plupart des études expérimentales sur les échangeurs air-sol portent sur l'influence des paramètres de dimensionnement : la longueur du tube, le diamètre du tube, l'épaisseur du tube, la typologie du réseau des tubes et la vitesse de l'air (voir la partie 2.4.1).

L'**originalité** réside dans le recours à trois types de sols pour l'enrobage qui ont des comportements thermiques et hydriques différents. Cette configuration favorise l'étude de l'influence des propriétés thermo-physiques d'un sol sur les performances énergétiques d'un échangeur air-sol.

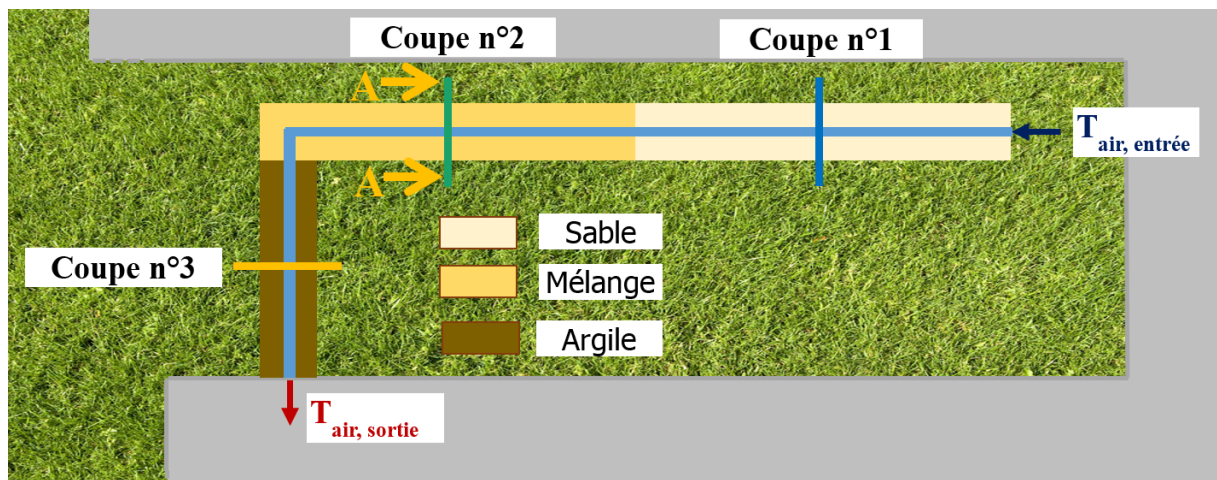


Figure 1.14 – Schéma de la vue de dessus de l'échangeur air-sol expérimental avec la position des trois coupes verticales instrumentées. Les positions des capteurs sont détaillées sur la figure 1.15.

1.3.3 Instrumentation de la plateforme

Les trois systèmes sont instrumentés par des capteurs de température et d'humidité à différents emplacements dans le sol et à l'intérieur de l'échangeur. Les capteurs de température (42 au total) sont des sondes PT100 avec une précision de 0,1 °C. L'humidité du sol est mesurée par trois capteurs TRIME©-pico64 de type TDR (Time Domain Reflectometry) fabriqués par la société SDEC avec une précision de ±2 %. Ceux-ci réalisent une mesure de la permittivité du sol au cours du temps par réflectomètre temporelle. La teneur en eau d'un sol est déduite de la permittivité à la suite d'un étalonnage dans l'eau et dans l'air.

La métrologie des différents capteurs est récapitulée dans le tableau 1.4. La température et l'humidité de l'air sont mesurées en entrée et en sortie de l'échangeur air-sol expérimental.

Paramètre mesuré	Grandeur	Unité	Type de capteur	Incertitude de mesure
Température du sol	T_i	$^{\circ}C$	PT100	0,1 $^{\circ}C$
Humidité du sol	HS	%	TDR	± 2 %
Température de l'air	T_p	$^{\circ}C$	PT100	0,1 $^{\circ}C$
Température et humidité de l'air	T_{air}	$^{\circ}C$	EE061	0,3 $^{\circ}C$
	HR	%		± 3 %

Tableau 1.4 – Récapitulatif de la métrologie sur la plateforme géothermique.

L'échangeur air-sol expérimental dispose de trois coupes verticales instrumentées qui sont positionnées au milieu des trois différentes sections. Cette instrumentation permet de connaître pour chaque coupe : la température de l'air circulant à l'intérieur de l'échangeur, la température du sol à trois profondeurs suivant l'axe vertical du tube, la température du sol à quatre emplacements selon l'axe horizontal du tube, la température à l'extérieur du tube et l'humidité du sol à l'interface entre le sol d'enrobage et le lit de pose. La position des capteurs est illustrée par les figures 1.15 et 1.16.

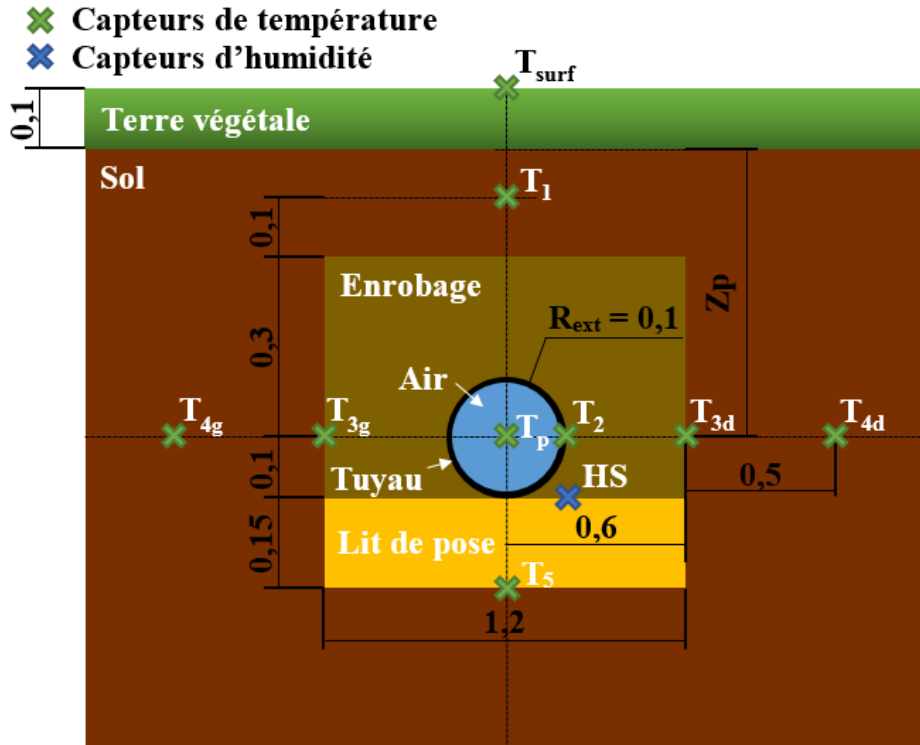


Figure 1.15 – Exemple de l'instrumentation d'une coupe verticale, illustré par la coupe A-A (coupe n°2), avec le détail du positionnement des capteurs de température et d'humidité. Les unités sont en mètre. La distance Z_p varie en fonction de l'emplacement de la coupe, voir le tableau 1.5.

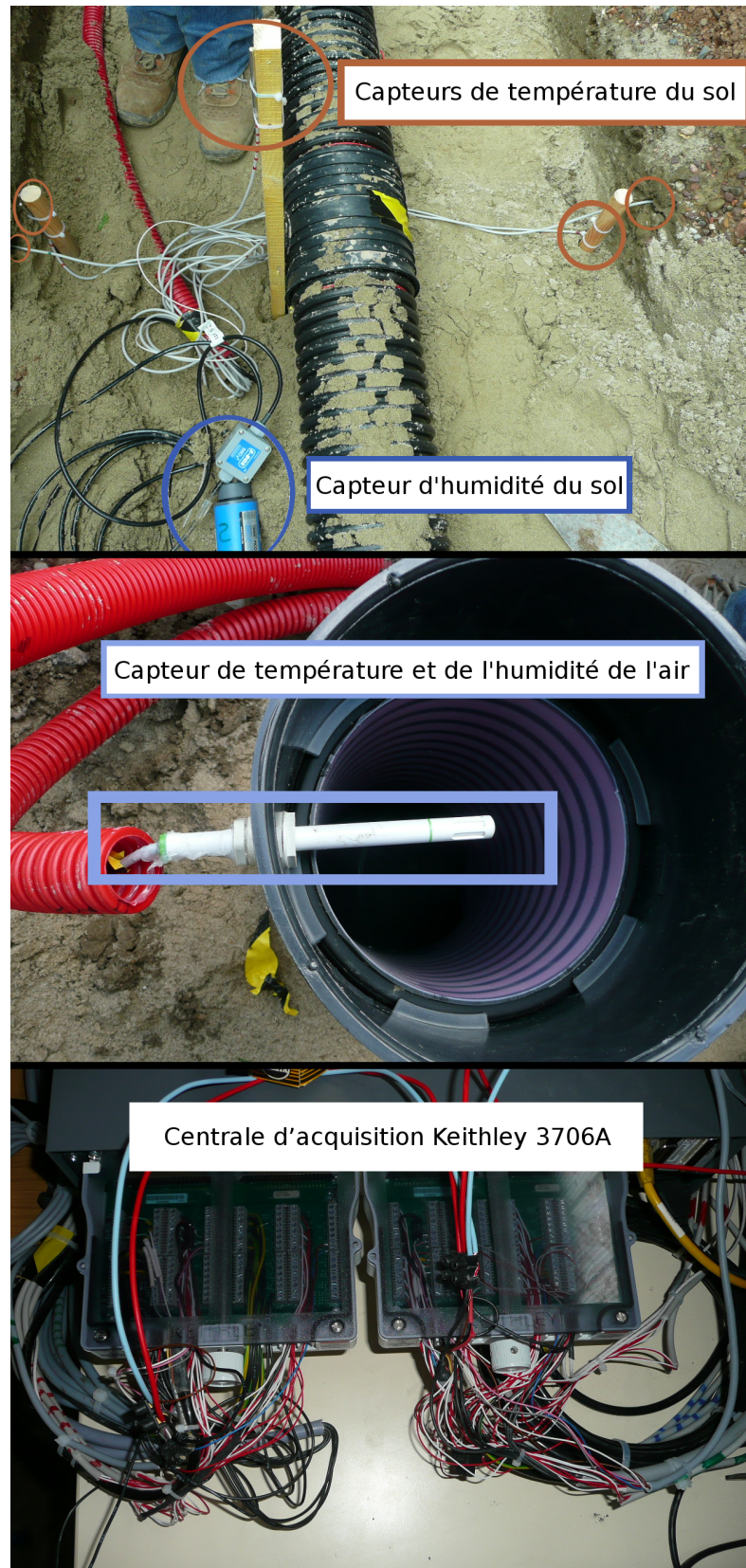


Figure 1.16 – Instrumentation de la plateforme. De haut en bas : positionnement des capteurs sur une coupe verticale; positionnement du capteur de température et de l'humidité de l'air en sortie de l'échangeur air-sol expérimental ; raccordement des capteurs sur la centrale d'acquisition Keithley 3706A.

Compte tenu de la pente de l'échangeur qui est de 2 % et afin d'évacuer les condensats, sa profondeur d'enfouissement Z_e varie suivant sa longueur, voir le tableau 1.5. Les capteurs installés sur chaque coupe verticale sont situés par rapport à la position du tube de l'échangeur pour permettre une comparaison entre différentes coupes verticales.

Type de l'enrobage	n° de la coupe verticale	Profondeur Z_p [m]	Longueur du tronçon L [m]
sable	1	$0,73 \pm 0,02$	$10,40 \pm 0,01$
sable-bentonite	2	$0,92 \pm 0,02$	$10,40 \pm 0,01$
argile in-situ	3	$1,20 \pm 0,02$	$8,20 \pm 0,01$

Tableau 1.5 – Caractéristiques des tronçons de l'échangeur air-sol expérimental et des coupes verticales.

Une centrale d'acquisition Keithley 3706A, illustrée par la figure 1.16, est utilisée pour enregistrer les valeurs mesurées des différents capteurs sur la plateforme. L'acquisition est réalisée à pas de temps constant toutes les 20 minutes. Cet intervalle de temps s'explique en raison d'un problème technique. Deux sources d'enregistrements (pour l'échangeur air-sol expérimental et celui pédagogique) sont traitées par la centrale d'acquisition. L'enregistrement de chaque dispositif est décalé l'un par rapport à l'autre de 10 minutes afin d'éviter les sources d'erreurs et les arrêts inopinés de la centrale. Celle-ci est pilotée par un programme *LabVIEW*, voir la figure 1.17, assurant l'enregistrement des mesures dans un fichier. Le programme permet aussi de visualiser l'enregistrement des mesures.

1.3.4 Traitement des données

La construction de la plateforme géothermique date de l'été 2012. La mise en marche des trois échangeurs et du système d'acquisition débutent à partir de septembre 2012. Depuis ce démarrage jusqu'à aujourd'hui, la plateforme fonctionne en continue (7/7 *j* et 24/24 *h*). Pendant ces cinq années de fonctionnement, la plateforme a subi quelques avaries techniques comme la détérioration précoce de certains capteurs et (le plus important) de la centrale d'acquisition. Ces problèmes ont eu pour conséquence un enregistrement intermittent et parfois non-réaliste des mesures. De plus, une mutation du programme d'acquisition, pour des raisons de mémoires de stockages insuffisants, donne lieu à un changement de format des fichiers d'enregistrement. Dans ce contexte, les données brutes enregistrées par le programme d'acquisition sont difficilement exploitables pour une analyse directe et un programme de traitement de données est nécessaire.



Figure 1.17 – Application développée sous *LabVIEW* pour l'enregistrement et la visualisation des données de mesures. Les pastilles de couleur grise indiquent la position des capteurs sur le site. Les pastilles à côté des baromètres permettent de visualiser la mesure sur le graphique en bas de l'image.

Dans le cadre de la thèse, ce traitement est réalisé à l'aide d'un programme développé dans le langage *Python*. Ce programme uniformise le format des données et élimine les valeurs erronées des capteurs défectueux. Ce traitement recueille les valeurs pour chaque capteur et permet ainsi de constituer une base de données fiables et organisées. Des fonctionnalités supplémentaires sont ajoutées au programme pour approfondir l'analyse des données. Celles-ci assurent :

- la réalisation de représentations graphiques XY ou en fonction du temps ;
- le suivi de l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur air-sol expérimental ;
- la détermination du champ de température du sol moyenné sur une période définie pour une coupe verticale ;
- l'exportation des valeurs de certains capteurs pour leurs utilisations dans un modèle analytique ou numérique.

État de l'art des modèles d'échangeurs de surface et des facteurs impactant sur ses performances énergétiques

La littérature dénombre une multitude d'études scientifiques sur les échangeurs géothermiques de surface. Ceux-ci concernent la géothermie à très basse énergie avec des réservoirs thermiques exploités se situant à une profondeur inférieure à 100 *m* pour une température de sol ne dépassant pas 30 °C. Deux types de captages exploitent cette ressource : les **captages verticaux** et les **captages horizontaux**.

La modélisation de ces deux technologies ne tient pas compte des mêmes transferts thermiques dans le sol et des mêmes conditions aux limites. Ainsi, les transferts thermiques pour les captages verticaux se focalisent essentiellement sur la conduction dans le sol avec des températures constantes pour les conditions aux limites [Phi10]. Par contre, la modélisation des captages horizontaux est plus complexe. L'interaction entre la surface du sol et l'atmosphère complique la définition des conditions aux limites à la surface du sol (rayonnement solaire, vent, température extérieure) [Thi08] qui sont dépendantes du temps. En outre, les transferts thermiques à différentes profondeurs se comportent distinctement : l'écoulement de l'eau de pluie influence l'humidité du sol qui elle-même impacte sur les propriétés thermo-physiques du sol.

Dans un but de cohérence vis-à-vis du sujet de thèse et de la plateforme géothermique, l'état de l'art concerne seulement la modélisation des échangeurs horizontaux. Une première partie présente les grandeurs utilisées pour caractériser les propriétés thermo-physiques d'un sol et les transferts de chaleur, voir partie 2.1 Grandeurs caractéristiques.

La modélisation des échangeurs horizontaux repose sur deux intérêts : la quantification des transferts de chaleur entre le sol et l'échangeur et la recherche des paramètres de premier ordre. Suite une étude bibliographique, deux approches se distinguent : une approche considérant l'homogénéité et l'invariance dans le temps des caractéristiques thermo-physiques du sol (2.2 Les modèles avec des propriétés thermo-physiques du sol homogènes et constantes) et une autre approche prenant en compte les répercussions

hydriques sur les transferts de chaleur (2.3 Modèles prenant en compte les propriétés hydriques du sol).

2.1 Grandeurs caractéristiques

Le sol est considéré comme un matériau constitué de grains solides indépendants et de diamètres variables. Les cavités entre les grains sont des vides remplis, soit par de l'eau soit par de l'air, voir la figure 2.1. La quantité d'eau présente dans les cavités permet de déterminer l'état d'humidité du sol :

- (a) état *sec* du sol : aucune présence d'eau dans les cavités ;
- (b) état *humide* du sol : présence partielle d'eau dans les cavités ;
- (c) état *saturée* du sol : les cavités sont remplies en totalité par de l'eau.

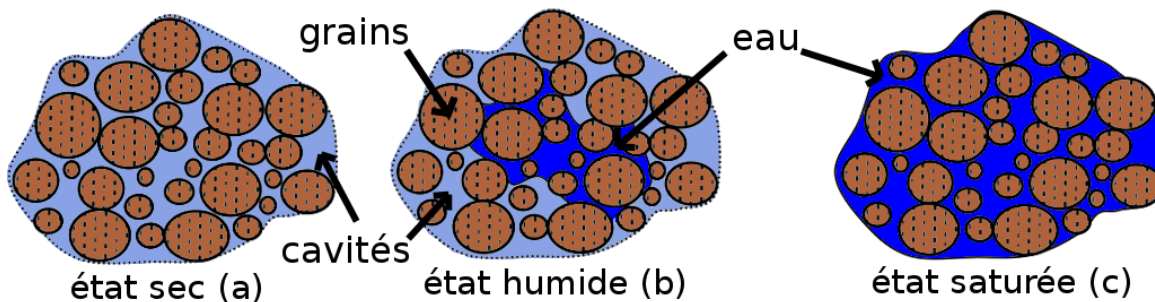


Figure 2.1 – Schématisation des états possibles d'un sol.

L'assemblage grain/air/eau peut être représenté selon leur volume (physique des milieux poreux [Bea72]) ou leur masse (mécaniques des sols [CK49 ; LW91]).

Représentation par volumes

La représentation par volumes tient compte du volume occupé par les grains solides V_s , les cavités vides V_v comprenant de l'air V_a et de l'eau V_w . Le tout est compris dans un volume fini V , voir la figure 2.2.

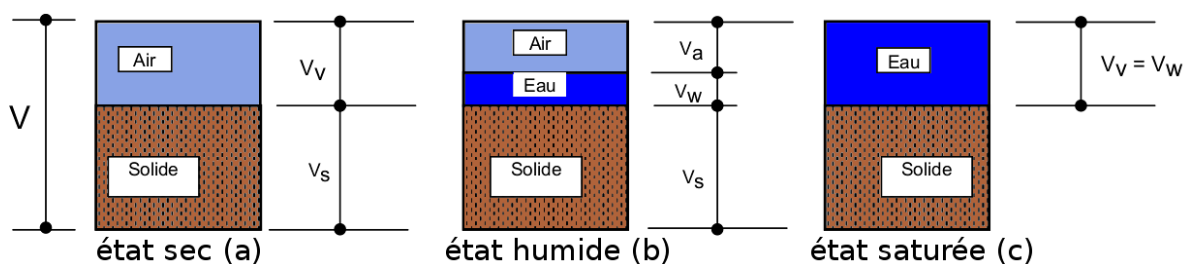


Figure 2.2 – Représentation du sol par volumes.

À partir de cette représentation, la notion de porosité totale n , compacité k , et de degré de saturation Sr sont introduites.

La **porosité** totale n [%] d'un sol traduit les capacités d'écoulement et de rétention d'un liquide dans un sol. Elle se définit par 2.1 :

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2.1)$$

La **compacité** k [%] représente la capacité d'un sol à extraire l'eau ou l'air emprisonné entre les grains. Elle se formule par 2.2 :

$$k = \frac{V_s}{V} \quad (2.2)$$

Le **degré de saturation** Sr [%] représente la proportion d'eau remplissant les vides. Elle s'exprime par l'équation 2.3 :

$$Sr = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.3)$$

Représentation en masses

Sur le même principe, la représentation en masses prend en compte la masse sèche m_s (engendrée par les grains solides), l'air m_a et l'eau m_w , voir la figure 2.3. La particularité de cette modélisation est de négliger la masse de l'air car sa masse volumique est très petite devant celles de grains et de l'eau.

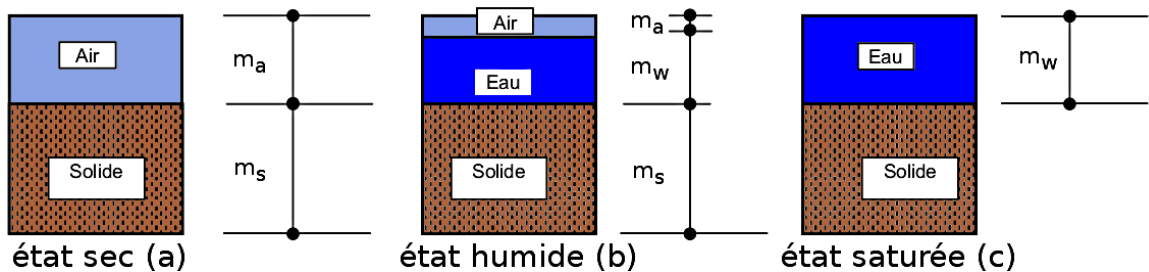


Figure 2.3 – Représentation en masses du sol.

La notion de **teneur en eau** w [$kg.kg^{-1}$] exprime la quantité d'eau présente dans le sol par rapport à la quantité de solide. Elle se définit par :

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad (2.4)$$

Taxonomie des sols

La taxonomie des sols est une classification des sols selon la nature, la taille et la composition du sol. Une classification usuelle est le triangle de classification de la texture du sol. Cette classification a été développée par le département d'agriculture des États-Unis (United States Department of Agriculture USDA), voir la figure 2.4. Le sol est caractérisé par la proportion de grains appartenant au type de sol argileux, limoneux et sableux. La taille des grains des différents types de sol s'obtient par une granulométrie avec l'utilisation de plusieurs modules de tamis. Ainsi, le sable est défini comme un sol composé par 85 à 100 % de sable, 0 à 10 % d'argile et 0 à 15 % de limon.

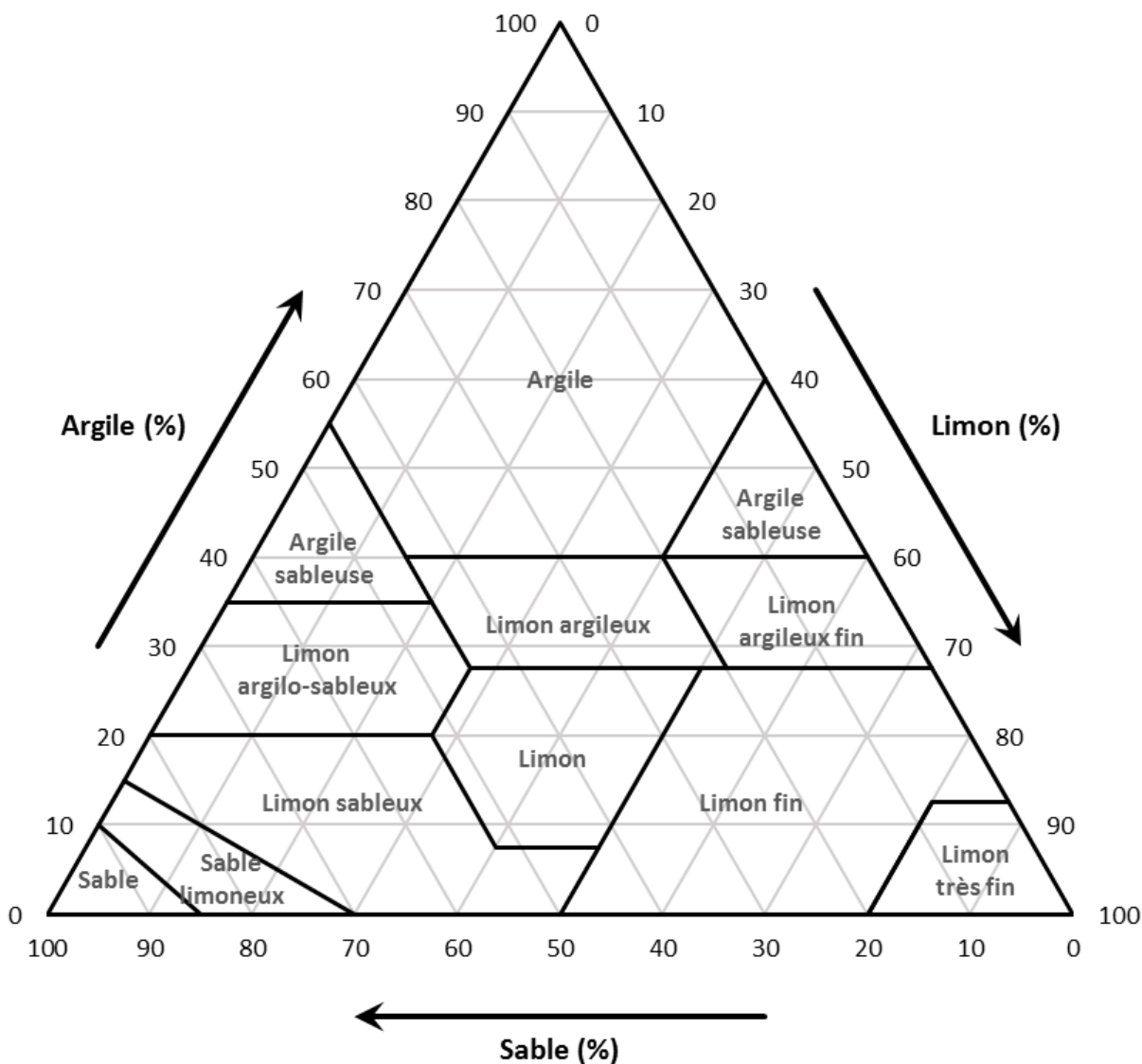


Figure 2.4 – Classification des sols par le département d'agriculture des États-Unis (USDA).

Caractérisation thermo-physique d'un sol

La caractérisation thermo-physique d'un sol est définie par ses grandeurs intrinsèques : la **conductivité thermique** λ [$W.m^{-1}.K^{-1}$], la **masse volumique sèche** ρ [$kg.m^{-3}$] et la **capacité thermique massique** c [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]. Ces valeurs dépendent de plusieurs paramètres tels que la masse volumique, le degré de saturation, la taille des grains et le type de sol. Le tableau 2.1 est utilisé généralement pour les calculs de transferts thermiques dans le sol et illustre la variabilité des propriétés thermo-physiques des sols.

La valeur de la **capacité thermique volumique** ρc [$J.m^{-3}.K^{-1}$] d'un sol peut être obtenue de manière analytique [ISO07] à partir de la masse volumique à l'état sec ρ [$kg.m^{-3}$], la capacité thermique massique des grains c_s [$J.kg^{-1}.K^{-1}$], la capacité thermique massique de l'eau c_w [$J.kg^{-1}.K^{-1}$] et la teneur en eau (humidité massique rapporté à l'état sec) ω [$kg.kg^{-1}$]. Elle est décrite par l'équation 2.5 :

$$\rho c = \rho (c_s + c_w \cdot \omega) \quad (2.5)$$

L'**effusivité thermique** e [$J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-\frac{1}{2}}$] relie la conductivité thermique et la capacité thermique volumique. Elle traduit la capacité d'un milieu à échanger sa chaleur avec son environnement. Elle représente la sensibilité de la température de surface d'un milieu à une variation du flux de chaleur reçu par cette surface. Cette grandeur est définie par l'équation 2.6 :

$$e = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (2.6)$$

Tableau 2.1 – Propriétés thermo-physiques de sols [ISO07].

Type de sol	Conductivité thermique λ [$W.m^{-1}.K^{-1}$]	Masse volumique sèche ρ [$kg.m^{-3}$]	Capacité thermique volumique ρc $\times 10^6$ [$J.m^{-3}.K^{-1}$]	Teneur en eau ω [$kg.kg^{-1}$]	Degré de saturation w [%]
Limon	1,0 à 2,0	1400 à 1800	1,99 à 4,06	0,10 à 0,30	70 à 100
Argile	0,9 à 1,4	1200 à 1600	2,20 à 4,28	0,20 à 0,40	80 à 100
Tourbe	0,2 à 0,5	400 à 1100	0,48 à 10,30	0,05 à 0,20	0 à 100
Sable sec	1,1 à 2,2	1700 à 2000	1,98 à 3,09	0,04 à 0,12	20 à 60
Sable humide	1,5 à 2,7	1700 à 2100	2,41 à 3,68	0,10 à 0,18	85 à 100
Roche	2,5 à 4,5	2000 à 3000	1,60 à 2,40	<i>a</i>	<i>a</i>

a : valeurs généralement très petites ($u < 0,03$), sauf pour les roches poreuses

La propagation de la chaleur dans le sol

Les transferts thermiques dans le sol sont régis principalement par la conduction thermique. Cette dernière est décrite par la **loi de Fourier** [Fou22]. Elle se définit par :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (2.7)$$

La loi de Fourier montre l’importance de la conductivité thermique d’un matériau λ lors d’un transfert de chaleur par conduction. La densité de flux de chaleur φ [$W.m^{-2}$] parcourant un milieu se quantifie par le produit du gradient de température T [K] et de la conductivité thermique du matériau λ [$W.m^{-2}.K^{-1}$] dans laquelle se meut la chaleur. Pour un même gradient de température, la valeur de la densité de flux évolue linéairement par rapport aux propriétés conductrices du matériau.

De l’expression de la loi de Fourier et à partir d’un bilan d’énergie, l’équation générale de conduction de la chaleur dans un corps homogène met en équation la propagation de la chaleur dans l’espace et le temps (équation 2.8).

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \phi_{prod} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.8)$$

Dans le cas des systèmes géothermiques de surface et en l’absence de source de chaleur, la conduction de chaleur dans le sol se simplifie sous une forme unidirectionnelle et peut se formuler par l’équation 2.9.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.9)$$

La propagation de la chaleur dépend non seulement de la conductivité thermique λ du sol mais aussi de sa masse volumique ρ [$kg.m^{-3}$] et de sa chaleur spécifique massique c [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]. Plus important encore, c’est le rapport de la conductivité thermique sur la capacité thermique volumique qui décrit le comportement de conduction de la chaleur dans le sol. Meilleur est la conduction thermique, plus petite sera la valeur de ce rapport. Concrètement, si on impose une température constante à la surface d’un sol sur une petite période (par exemple le rayonnement solaire), le gradient de température entre la surface et la profondeur z sera plus petit pour un sol avec une meilleure conductivité thermique car la propagation de la chaleur est plus rapide.

Un moyen d’étudier le comportement thermique d’un sol est d’avoir recours à la grandeur physique de la **diffusivité thermique** D [$m.s^{-2}$] qui caractérise la capacité d’un milieu à transmettre une onde thermique d’un point à un autre. Elle se définit par l’équation 2.10 :

$$D = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (2.10)$$

Lorsque un milieu homogène semi-infini est soumis à une onde thermique périodique sinusoïdale (par exemple la température annuelle de l'air extérieur), la diffusivité thermique permet de caractériser la **profondeur** ou la **longueur de pénétration** δ [m] du milieu, voir équation 2.11. Celle-ci dépend de la pulsation de l'onde thermique θ [rad.s⁻¹] et des caractéristiques thermo-physiques du sol définies par la diffusivité thermique D . Cette longueur correspond à la profondeur à laquelle l'amplitude de l'onde thermique est amortie d'un facteur exponentiel. Au-delà de deux à trois fois cette longueur, les oscillations sinusoïdales de températures ne pénètrent plus dans le milieu.

$$\delta(\theta) = \sqrt{\frac{2 \cdot D}{\theta}} \quad (2.11)$$

2.2 Les modèles avec des propriétés thermo-physiques du sol homogènes et constantes

Une grande partie des modèles analytiques se limite à considérer une source de chaleur linéique infinie dans un milieu homogène semi-infini. La source de chaleur représente ici l'échangeur horizontal. Dès 1948, Ingersool et Plass [IP48] utilise ce modèle en imposant une température constante à la surface du sol.

Pinel [Pin08] remplace la condition à la surface du sol par une sollicitation périodique. La température du sol est ainsi obtenue à partir de la relation de Kasuda [KA65]. Cette température est fonction de la profondeur considérée et de la période de l'année. Claesson et Dunand [CD83] approfondissent la condition à la surface du sol par une sollicitation harmonique. Ce modèle prend en compte des sollicitations de l'échangeur à différents niveaux de puissance en découpant le signal en différents échelons et en superposant temporellement leurs influences respectives. Par contre, l'extraction de la chaleur par l'échangeur n'interagit pas avec le sol et les variations d'humidité dans le sol ne sont pas prises en compte. Seule la conduction thermique est considérée et les transferts de chaleur dans la direction de l'axe de l'échangeur sont négligés.

2.2.1 Modèle de Trombe et Bourret (1993)

Dans leur rapport dans le cadre du contrat de recherche « contrat puits provençal » [TB93], Trombe et Bourret proposent une modélisation d'échangeur air-sol. Ils présentent aussi leur plateforme expérimentale et l'étude des facteurs sensibles sur les performances thermiques d'un échangeur air-sol en mode préchauffage et rafraîchissement.

Le modèle de l'échangeur air-sol est assimilé à un problème linéaire d'un milieu semi-infini, homogène et isotrope avec une condition de Fourier en surface et une (ou plusieurs) source de chaleur linéique. Le système est résolu en décomposant le problème en deux

processus élémentaires, voir figure 2.5 : une source de chaleur en milieu infini et un milieu semi-infini soumis à une température extérieure variable en fonction du temps.

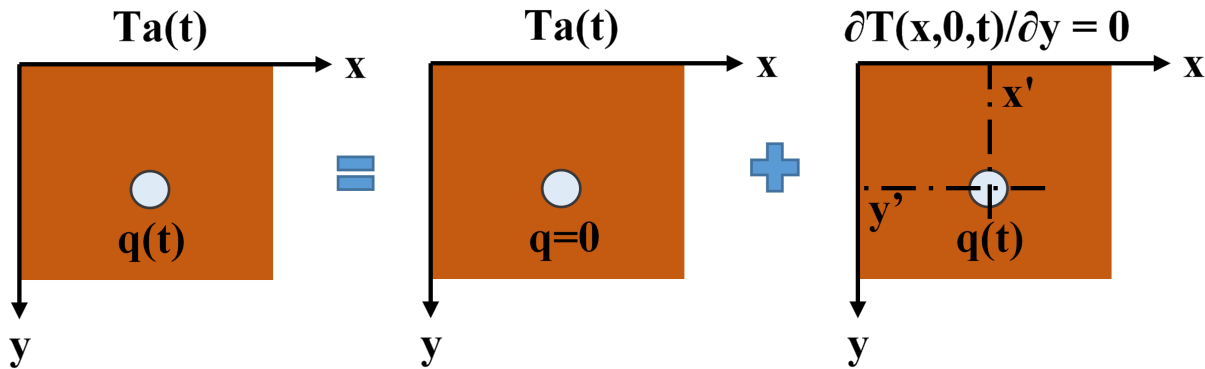


Figure 2.5 – Décomposition du problème thermique en deux processus élémentaires [Dun82].

Leur plateforme expérimentale se compose de trois échangeurs air-sol : un de 37 m de long et trois autres de 14 m avec différents types de tube (PVC lisse, PVC annelé et Fibro-Ciment). Chaque échangeur est instrumenté par : des mesures de température et d’humidité de l’air (en entrée, en sortie et à divers emplacements); des mesures de température du sol; et des mesures de flux situées à l’extérieur des tubes. À partir de ces relevés, le modèle précédent est validé.

2.2.2 Modèle de Hollmuller (2003)

La thèse de doctorat de Hollmuller constitue l’une des principales références d’études thermiques sur les échangeurs air-sol [Hol02]. À partir de nombreuses mesures et le développement de deux modèles (un modèle analytique et un modèle numérique), l’auteur établit des règles simples de dimensionnement.

Le modèle analytique considère un tube cylindrique entouré d’un sol homogène d’épaisseur finie soumis à une condition au bord adiabatique ou isotherme. La température de l’air est modélisée par un signal de forme sinusoïdale pour résoudre le problème soit en régime stationnaire soit en régime périodique [Hol03]. L’échangeur est considéré comme un filtre avec des capacités d’amortissement et de déphasage dépendantes de l’oscillation de la température d’air en entrée d’échangeur. Pour caractériser ce phénomène, il utilise la notion de *longueur de pénétration* (expliquée dans la partie 2.1 Grandeurs caractéristiques) pour laquelle la température du sol est fortement influencée par la variation de la température de l’air circulant dans le tube.

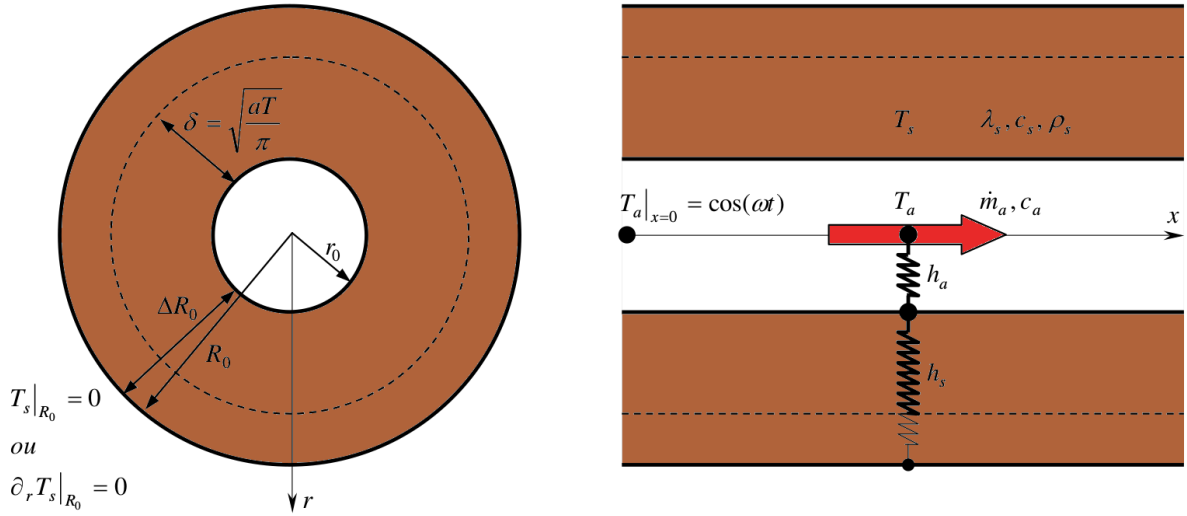


Figure 2.6 – Schéma de principe pour la formulation analytique de l'échange diffusif cylindrique air-sol. À gauche : coupe perpendiculaire. À droite : coupe longitudinale [Hol02].

Dans cette étude, la conduction thermique dans le sens de la longueur du tube, les transferts de chaleur par migration d'eau et la paroi du tube sont négligées.

Hollmuller a développé aussi un modèle numérique adapté au logiciel TRNSYS. Ce modèle permet une définition des géométries, des caractéristiques du sol, des conditions de surface, des infiltrations d'eau, des pertes de charge et du contrôle du sens du flux d'air. Il traite conjointement les échanges sensibles et latents entre l'air et le tube ainsi que la diffusion thermique dans le sol adjacent.

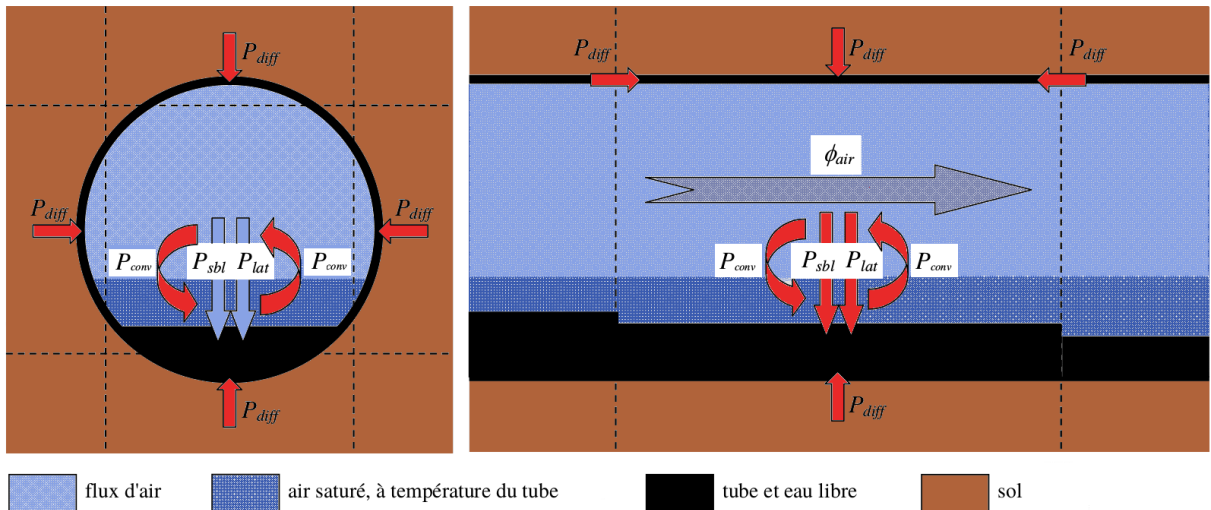


Figure 2.7 – Schématisation des échanges sensibles P_{lat} , latents P_{lat} , diffusifs P_{diff} et convectifs P_{conv} au niveau du segment du tube [Hol02].

2.2.3 Modèle de Thiers (2008)

Le modèle de l'échangeur air-sol proposé par Thiers [Thi08] repose sur deux modèles distincts : un modèle analytique décrivant les transferts thermiques dans le sol et un modèle numérique calculant les transferts thermiques dans l'échangeur air-sol.

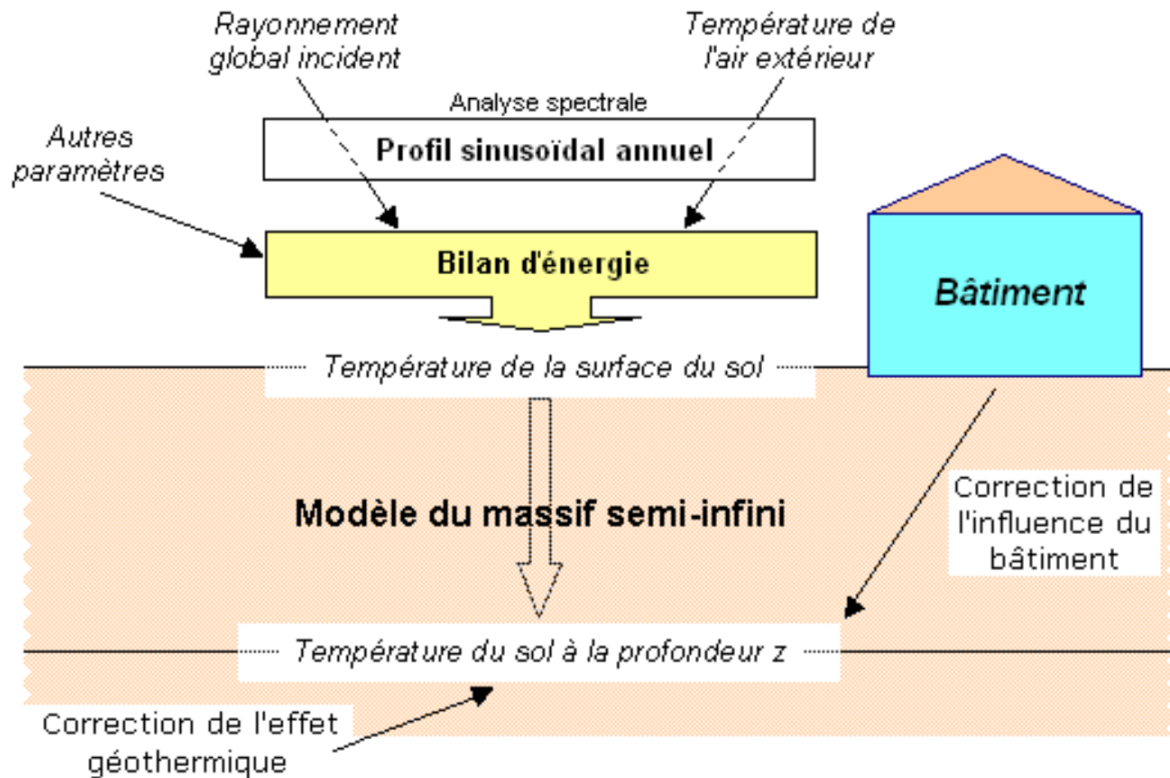


Figure 2.8 – Schéma du modèle de température du sol non perturbé [Thi08].

Le premier modèle, le **modèle thermique du sol**, est capable de calculer à tout instant et en tout point la température du sol mais sans prendre en compte la perturbation thermique causée par l'échangeur air-sol. Il tient compte de trois phénomènes indépendants (figure 2.8) : la conduction thermique dans le sol (modèle du massif semi-infini) soumise aux conditions climatiques, le flux thermique provenant d'un bâtiment voisin et le flux thermique d'origine géothermique. La température du sol est déterminée par superposition de ces trois contributions dans un milieu homogène. Le résultat est décrit par la somme des trois termes analytiques [TP08].

Le second modèle, le **modèle thermique de l'échangeur air-sol**, calcule la température de l'air en sortie de l'échangeur en fonction de deux paramètres : la température de l'air en entrée et la température du sol obtenue par le premier modèle. Le modèle est maillé (figure 2.9) à partir de mailles à section circulaire pour l'air, de mailles à section annulaire pour le tube et le sol1, et des mailles à section oblongue pour le sol2. Le modèle est résolu numériquement en utilisant la méthode des différences finies.

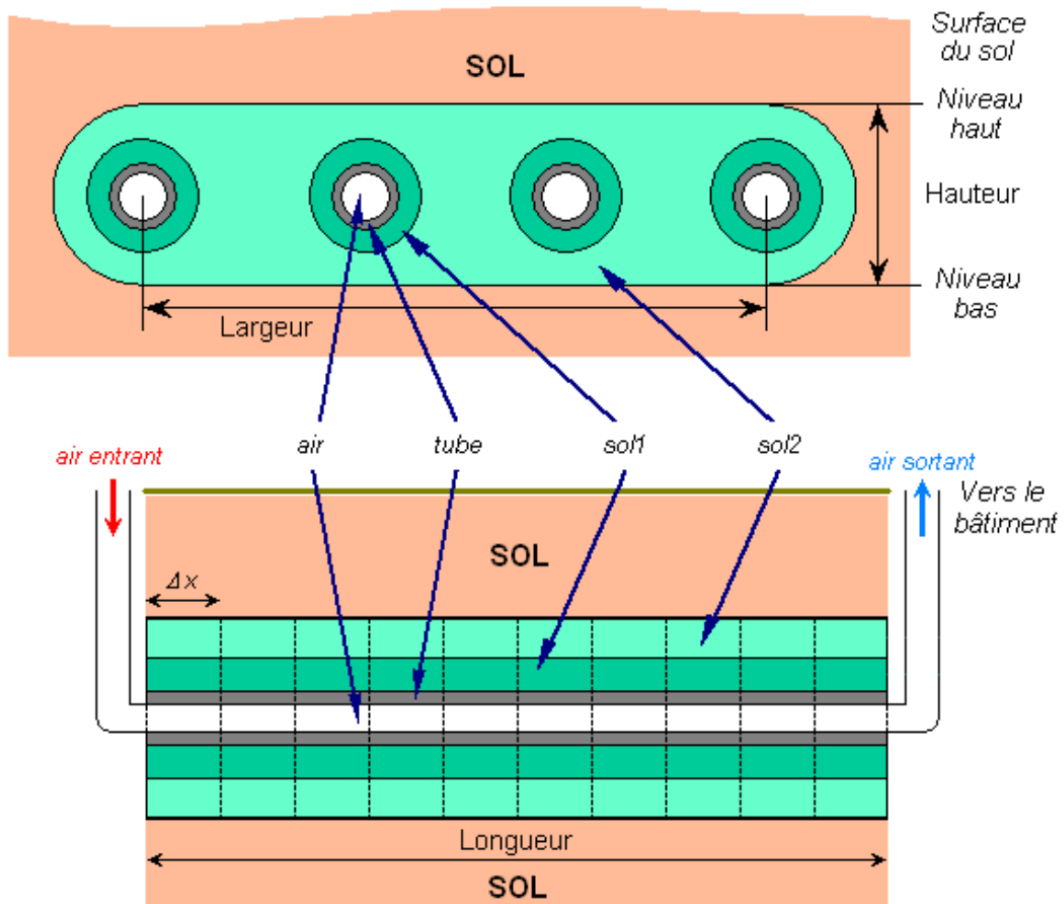


Figure 2.9 – Schéma du maillage (échelle non respectée) vue de face (haut) et vue latérale (bas) de la modélisation d'un échangeur air-sol [Thi08].

L'objectif de simplicité du modèle permet un calcul rapide mais comporte un certain nombre de limites à cause des éléments qui ne sont pas pris en compte :

- les changements d'état de l'eau dans les tubes ;
- la présence d'une nappe phréatique sous la zone d'implantation de l'échangeur ;
- l'hétérogénéité de la nature du sol et la variation des propriétés thermiques du sol.

Il est à noter que le logiciel *Pléiades Comfie* utilise le modèle de Thiers pour résoudre des problèmes thermiques dans le bâtiment avec des simulations thermiques dynamiques.

2.2.4 Modèle de Philippe (2010)

La thèse de doctorat de Mickaël Philippe [Phi10] porte sur le sujet du « *Développement et [de] la validation expérimentale de modèles d'échangeurs géothermiques horizontaux et verticaux pour le chauffage de bâtiments résidentiels* ». Il propose un modèle d'échangeur horizontal à géométrie paramétrique décliné en deux versions : une version avec des sollicitations de courte durée (de quelques minutes à plusieurs heures) et une autre sur de plus longues durées (de quelques heures à plusieurs années).

Le premier modèle est utilisé pour les calculs dynamiques avec des sollicitations de courte durée. Il est assimilé à un unique tuyau rectiligne dans un milieu infini. Cette hypothèse se justifie par le fait que les conditions aux limites imposées par la surface du sol sont négligeables en raison de sollicitations de courte durée. La longueur de pénétration est de l’ordre de 14 *cm* pour une sollicitation journalière [Dun82]. Les transferts thermiques sont pris en compte sous deux formes : des échanges 1D convectifs fluide-paroi et des échanges de conduction 1D radiaux aux tubes qui ont lieu dans le sol. Ces deux échanges sont modélisés indépendamment mais couplés par superposition temporelle [IP48].

Le deuxième modèle concerne les calculs en régime transitoire pour des sollicitations de longues durées. Le modèle considère les mêmes transferts de chaleur que précédemment : échanges convectifs fluide-paroi et échanges de conduction dans le sol. Les nouveaux éléments sont : la condition à la surface du sol qui est une température annuelle sinusoïdale et les transferts de chaleur entre différents tubes (lors d’un réseau en parallèle) d’après la méthode de Pinel [Pin08]. Ce modèle superpose spatialement l’influence des différents tuyaux en tenant compte des puissances évacuées par chacun. Faisant suite à une étude de sensibilité sur la température de sortie soumise à un échelon de température de 30 °C en entrée d’un échangeur, il met en évidence l’influence de cinq paramètres classés par ordre d’importance :

- la conductivité thermique du sol ;
- la température initiale du sol ;
- la distance entre chaque tuyau ;
- la diffusivité thermique du sol ;
- la capacité calorifique du fluide.

Ces modèles sont validés avec les données de la plateforme expérimentale du Bureau de Recherche Géologiques et Minière (**BRGM**) sur une période de 80 *h*. L’hypothèse supposant les transferts de conduction dans le sol avec une homogénéité du sol implique une influence négligeable de l’écoulement de l’eau lors d’événements pluvieux sur le profil vertical de la teneur en eau du sol. Cette hypothèse est étayée par des relevés hebdomadaires in-situ de l’humidité du sol tous les 0,1 *m* sur une profondeur entre 0,1 et 1,7 *m*. Les relevés sont réalisés sur une période de 6 semaines entre le 13 janvier et 25 février 2010. Le profil ainsi obtenu est quasi-constant. L’écart maximal entre deux valeurs d’humidité pour une même profondeur est de 1,2 %, voir la figure 2.10. Cependant, la durée et la quantité de précipitation des épisodes pluvieux ne sont pas détaillées durant la campagne d’essai. Afin de vérifier cette hypothèse, il serait donc intéressant d’étudier l’interaction de la précipitation de la pluie sur le profil vertical de la teneur en eau d’un sol.

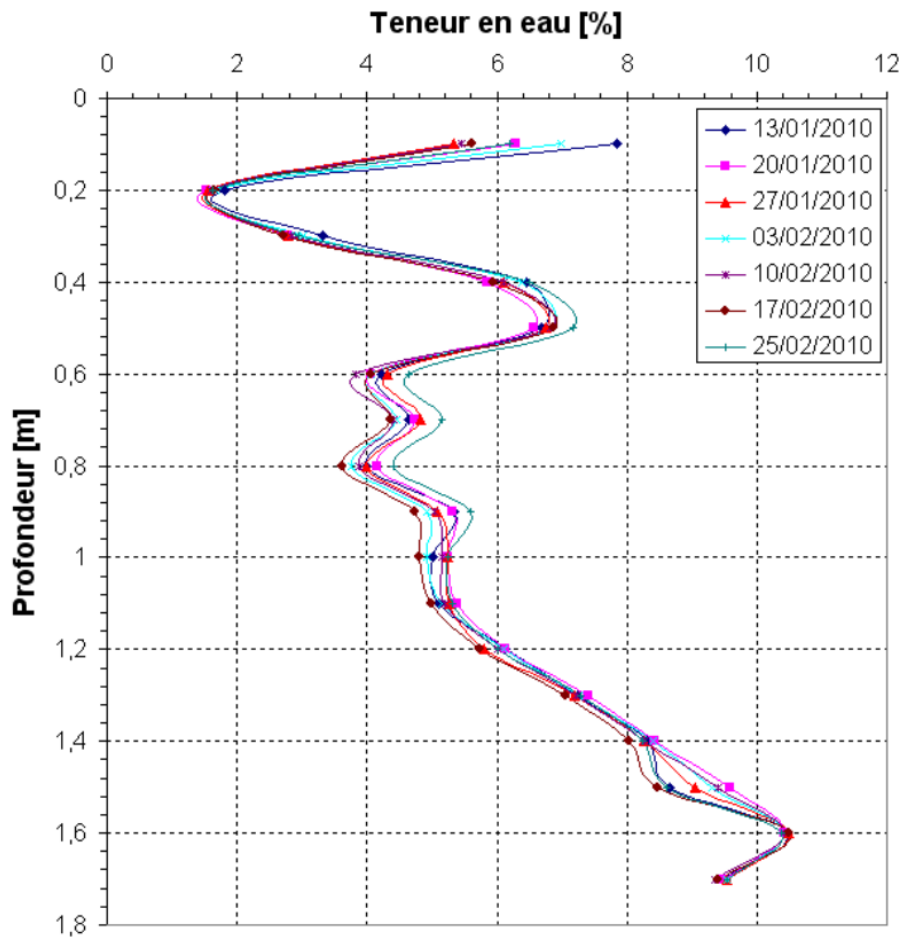


Figure 2.10 – Relevés hebdomadaires d’humidité dans le sol [Phi10].

2.3 Modèles prenant en compte les propriétés hydriques du sol

Les modèles précédents considèrent des propriétés thermo-physiques du sol constantes malgré des conditions météorologiques variables. Plusieurs études scientifiques s’intéressent aux phénomènes thermiques et hydrauliques dans le sol en développant des modèles de transferts de chaleur et de masse.

2.3.1 Modèle de Dunand (1982)

La thèse de doctorat de Dunand [Dun82] est très riche en informations. Il propose un modèle 2D avec une résolution numérique prenant en compte des phénomènes physiques qui influencent significativement le comportement thermique d’un échangeur horizontal. Ces phénomènes physiques sont déterminés à partir des résultats de l’étude de trois modèles distincts : un modèle de conduction linéaire des transferts de chaleur **dans le sol**, un deuxième modèle consacré aux transferts de chaleur et de masse entre la **surface du**

sol et les basses couches atmosphériques, et un troisième modèle de transferts de chaleur et de masse localisé au voisinage du **tube de l’échangeur**.

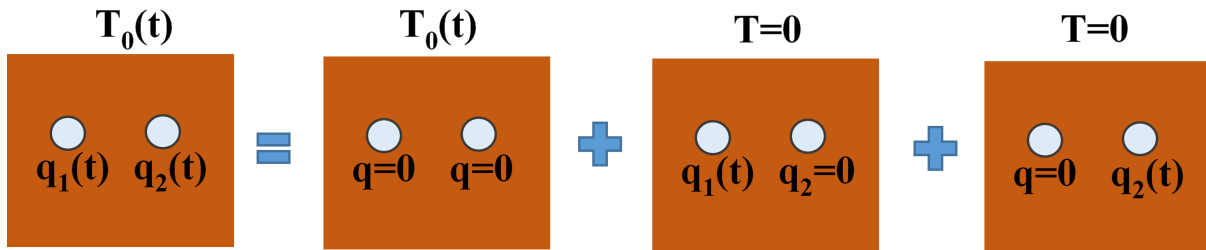


Figure 2.11 – Superposition de trois processus thermiques élémentaires [Dun82].

Le premier modèle envisage le problème de l’extraction de la chaleur dans le sol comme un problème thermique linéaire avec des conditions aux limites linéaires. Le problème global est alors résolu comme une superposition de problèmes élémentaires, voir la figure 2.11. Ces suppositions nécessitent de négliger les effets liés à la variation de l’humidité du sol ou ses changements de phase dans le temps. Le modèle obtenu est résolu analytiquement en régime permanent, soumis à un échelon, en régime périodique et en régime harmonique.

Le deuxième modèle est un modèle de calcul 1D thermohydraulique d’un sol soumis à l’influence des conditions climatiques. Le modèle prend en compte les transferts de conduction dans le sol avec des paramètres thermiques en fonction de la teneur en eau et de la température, des transferts de masse engendrés par les gradients de pression et de température, une température à la surface du sol prédite par un calcul radiatif et énergétique, et l’infiltration de la précipitation de pluie par un écoulement gravitaire. Le modèle est simulé à partir de données climatiques réelles pendant une période de 6 mois. Les résultats de la simulation prédisent *une extraction de la chaleur par le tuyau provenant, dans sa quasi-totalité, de l’énergie transmise par l’atmosphère au sol.*

Le troisième modèle étudie les transferts de chaleur et de masse autour d’un tuyau à l’aide d’un modèle de calcul fondé sur la théorie de Philip et De Vries. Les résultats n’indiquent pas d’influences importantes du couplage entre transferts de chaleur et transferts de masse sur le comportement d’un échangeur horizontal.

Pour finir, à partir des résultats de ces trois modèles, Dunand propose une version 2D d’un modèle de calcul des transferts de chaleur dans le sol autour d’un échangeur prenant en compte les transferts verticaux de l’humidité du sol, les transferts de chaleur et de masse entre le sol et l’atmosphère, voir la représentation schématique de la figure 2.12. Le modèle est validé avec des données expérimentales.

Les principaux résultats des travaux de Dunand renseignent sur le comportement global du système :

- lors de l’extraction de la chaleur du sol par les tuyaux enterrés, les transferts thermiques sont caractérisés par une zone de forts gradients thermiques autour des

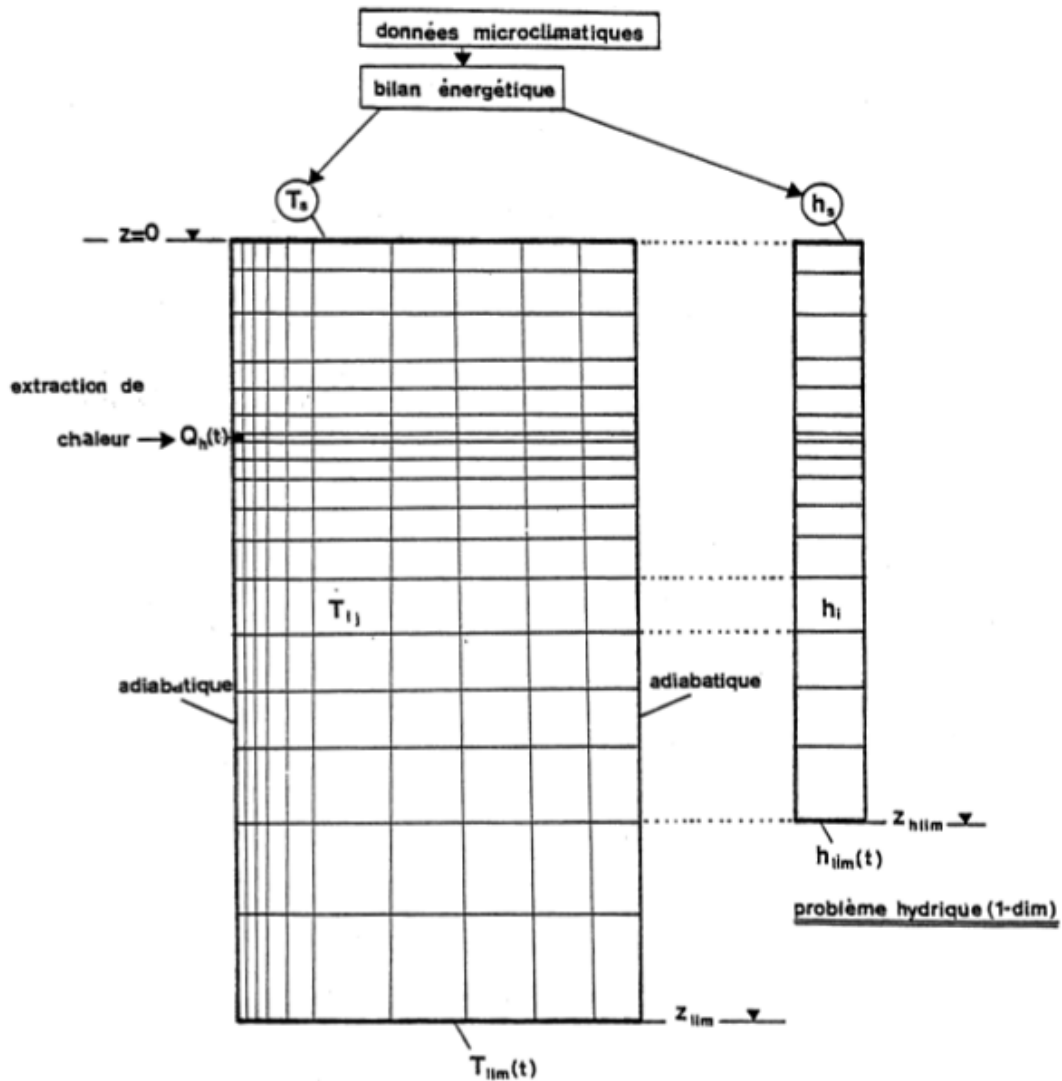


Figure 2.12 – Représentation du modèle numérique 2D par Dunand [Dun82].

tuyaux ;

- pendant le fonctionnement du système, une grande partie de l'énergie extraite par l'échangeur est fournie par la surface du sol ;
- la recharge thermique naturelle du sol est fournie dans sa quasi-totalité par l'atmosphère à travers la surface du sol lors de l'arrêt de l'extraction ;
- l'efficacité thermique du système dépend surtout des caractéristiques thermiques du sol, des coefficients d'échanges thermiques dans les tuyaux, de la profondeur d'enfouissement des tuyaux et de l'espacement entre eux.

2.3.2 Modèle de Mihalakakou (1994)

La modélisation d'échangeur air-sol proposée par Mihalakakou [MSA94] est un modèle numérique transitoire implicite en volumes finis développé sous *TRNSYS*. Les transferts de chaleur et de masse dans le sol et à l'intérieur du tube de l'échangeur sont considérés.

La température du sol au voisinage du tube est obtenue par superposition du champ de température dans le sol sollicité par l’échangeur et par le champ de température imposé par la température de l’air à la surface du sol (sollicitation périodique de fréquence annuelle). Cette condition implique une homogénéité du sol. Le modèle est validé avec les données expérimentales sur une période estivale de 15 *jours* par pas de temps de 10 *min*. L’échangeur air-sol avait les caractéristiques suivantes : 14,8 *m* de long, tube en plastique, 0,15 *m* de diamètre, 1,10 *m* de profondeur et une vitesse de l’air de 10,5 $m.s^{-1}$.

À partir de son modèle, Mihalakakou [Mih94] étudie l’influence de plusieurs paramètres en été sur les performances énergétiques pour le rafraîchissement d’un échangeur air-sol composé d’un réseau de tubes en série et en parallèle. Ceux-ci augmentent si la longueur de l’échangeur accroît, si le diamètre du tube diminue, si la vitesse de l’air ralentit, si la distance entre les tubes est grande et s’il y a de l’herbe à la surface du sol (comparé à un sol nu).

2.3.3 Modèle de Piechowski (1996)

Piechowski [Pie96] propose un modèle numérique 2D d’un échangeur horizontal. Le modèle consiste à résoudre trois équations : une est liée au bilan énergétique de la circulation d’un fluide dans un tube et les deux autres décrivent le phénomène transitoire et simultané du transfert de chaleur et de masse dans le sol. Pour mener à bien la résolution de ces équations, certaines hypothèses sont effectuées :

- le sol est homogène ;
- le type de sol ne change pas le long du tube ;
- le transfert de chaleur dans le sol est axisymétrique ;
- le transfert de chaleur parallèle à l’axe du tube est négligé ;
- la température du sol à une certaine distance est influencée par les ondes journalières et saisonnières et non par le fonctionnement de l’échangeur horizontal ;
- les échanges convectifs sont considérés à la surface du sol ;
- la température et la vitesse du fluide circulant à chaque section du tube sont supposées constantes ;
- l’influence de la gravité sur le transfert de l’eau dans un sol saturé est négligée.

Les résultats de ce modèle ont été validés [Mir98] à l’aide d’un échangeur géothermique expérimental. L’instrumentation du site comportait de nombreux thermocouples permettant de valider le modèle. Il précise que l’estimation des conditions initiales du type de sol et de son humidité influencent largement la prédiction des performances énergétiques d’un échangeur géothermique.

2.3.4 Modèle de Gan (2014)

Gan a développé un modèle numérique d'un échangeur horizontal [Gan14]. Ce modèle résout les équations de transferts de chaleur et de masse dans le sol par la méthode des volumes finis en utilisant des mailles hexaèdres. Il impose des conditions de température d'air, de pression, de vitesse de vent, de radiation solaire, de précipitation d'eau de pluie et de couverture du sol (pelouse et sol nu) comme condition à la surface du sol. Au niveau du tube, il décompose les phénomènes thermiques en trois parties. Premièrement à l'intérieur du tube, les transferts thermiques considérés sont la conduction, la convection et condensation/évaporation. Deuxièmement, la conduction thermique est évaluée dans le tube. Troisièmement, à l'extérieur du tube et dans le sol, la conduction, le gel/décongélation et la condensation/évaporation sont prises en compte. Le milieu du sol est considéré homogène avec une condition de température imposée pour le flux géothermique. Les différentes conditions aux limites sont explicitées sur la figure 2.13. La température du sol en condition initiale est obtenue par le modèle du milieu semi-infini en imposant une sollicitation périodique annuelle à la surface du sol. Le modèle permet de simuler les transferts thermiques et hydriques dans le sol en prenant en compte l'interaction thermique d'un échangeur air-sol.

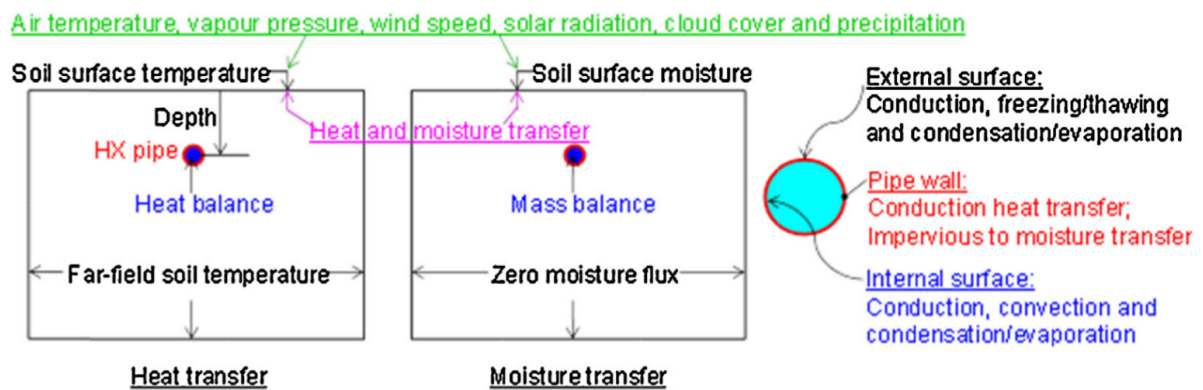


Figure 2.13 – Conditions aux limites pour la simulation des transferts de chaleur et hydrique le long d'un échangeur horizontal [Gan14].

Le modèle est validé par une comparaison des résultats avec le logiciel commercialisé *FLUENT* pour le cas d'un échangeur air-sol enterré à 1,5 m de profondeur. Le comparatif des deux simulations sur une période de 30 jours concordent avec une différence maximale de 1 %.

2.4 Les facteurs impactant sur les performances énergétiques des échangeurs de surface

La partie précédente relate les différents modèles d'échangeurs horizontaux dans la littérature. Généralement, ceux-ci sont séparés en deux modèles. Le premier concerne celui de l'échangeur en lui-même avec la détermination de la température du fluide circulant dans le réseau de tubes. Le deuxième est celui du sol calculant la température à imposer à la surface du tube. Dans un objectif de répertorier les différents paramètres pouvant influencer sur les performances énergétiques d'un échangeur horizontal, un état de l'art est réalisé et réparti en trois parties. La première explore les paramètres de dimensionnement de l'échangeur (longueur de tube, diamètre de tube, épaisseur du tube, typologie du réseau de tubes, vitesse de l'air, ... voir la partie 2.4.1 "Les paramètres de dimensionnement et de fonctionnement des échangeurs"). Une deuxième partie présente les études portant sur l'influence des conditions environnementales et climatiques sur un échangeur horizontal, partie 2.4.2 "Les conditions climatiques et environnementales". Cette partie met en évidence l'importance du rôle des propriétés thermo-physiques du sol sur les performances énergétiques d'un échangeur horizontal. C'est pourquoi, la troisième et dernière partie se consacre à l'étude des facteurs sensibles aux propriétés thermo-physiques d'un sol (voir la partie 2.4.3 "Les propriétés thermo-physiques du sol").

2.4.1 Les paramètres de dimensionnement et de fonctionnement des échangeurs

De nombreuses études sont portées sur la configuration des échangeurs horizontaux afin d'extraire la plus grande quantité d'énergie du sol. Ces études peuvent être classées dans deux grandes catégories : les études sur les paramètres de dimensionnement (longueur de l'échangeur, diamètre du tube, profondeur d'enfouissement et type de tube) et les paramètres de fonctionnement modifiables après l'installation de l'échangeur (vitesse d'air et mode de fonctionnement : intermittent/continu).

2.4.1.1 Paramètres de dimensionnement

Le rapport de Trombe et Bourret [TB93] présente à partir du modèle d'échangeur air-sol développé (voir 2.2.1 Modèle de Trombe et Bourret) une étude de sensibilité paramétrique - 105 configurations étudiées - influençant sur le comportement thermique d'un échangeur air-sol. Les paramètres influents résultant de cette étude concernent la longueur du tube et la profondeur d'enfouissement de l'échangeur. Les résultats montrent que le diamètre du tube influence très peu les performances. Trombe et Bourret éclairent ce résultat par l'explication suivante : pour un débit donné, une vitesse d'air constante, l'augmentation du diamètre entraîne une augmentation de la surface d'échange mais qui

est compensée par une diminution du coefficient d'échange convectif impliquant moins de transferts de chaleur entre le sol et l'air.

Par ailleurs, Mihlakakou entreprend une étude de sensibilité de dimensionnement à partir d'un modèle numérique développé dans l'environnement *TRNSYS* [MSA94]. Un échangeur air-sol est simulé par pas de temps horaire pour les mois de juillet et août entre 1891 et 1990. L'échangeur se décline en plusieurs configurations :

- des longueurs de tube définies à 30, 50 et 70 m ;
- des diamètres de tube fixés à 0,125, 0,180 et 0,250 m ;
- des profondeurs d'enfouissement de l'échangeur fixées à 1, 2, 2,0 et 3,0 m.

Cette étude de sensibilité est complétée par le même auteur et pour les mêmes conditions [Mih94] avec les paramètres : la couverture du sol (pelouse ou sol nu) et la typologie des tubes (en série ou parallèle). Les différents résultats de simulation peuvent être résumés en une phrase : la température de sortie est moins élevée (meilleure performance thermique) avec une augmentation de la longueur du tube, avec une diminution du diamètre du tube, avec une augmentation de la profondeur d'enfouissement du tube, avec une couverture de sol en présence d'herbe et avec un réseau de tube en parallèle. Gan [Gan17] précise que les échangeurs eau-sol sont plus efficaces que les systèmes air-sol.

Au niveau expérimental, Abbaspour-Fard et al. [AGK11] obtiennent les mêmes effets. Ils ont testé en Iran les performances énergétiques d'un échangeur air-sol avec de multiples paramètres : longueur des tubes, profondeur d'enfouissement et le type de matériel pour le tube. Après 72 essais, tous les paramètres sont directement liés à la performance énergétique à l'exception du matériel du tube de l'échangeur.

2.4.1.2 Paramètres de fonctionnement

L'influence de la vitesse de l'air circulant dans un échangeur air-sol sur ses performances énergétiques est étudiée numériquement [TB93 ; MSA94] et expérimentalement [AGK11]. Les différentes études parviennent au même constat : une diminution de la vitesse de l'air implique une augmentation de ses performances énergétiques.

Un point important est la régénération du sol : la circulation de l'air (circulant ou non) en mode intermittent à heure fixe ne joue pas un rôle important sur les performances d'un échangeur [TB93]. Concernant ce dernier point, dans l'étude [NC14], Nam signale le constat inverse : les performances énergétiques sont meilleures lorsque l'échangeur fonctionne en mode intermittent plutôt qu'en mode continu. Cependant, son étude concerne un échangeur eau-sol placé sous le sous-sol d'un immeuble avec garage. Bansal [Ban13] conduit les mêmes résultats que Nam mais cette fois avec un échangeur air-sol modélisé par un modèle numérique transitoire 3D.

2.4.2 Les conditions climatiques et environnementales

Cette partie relate, à partir d’études scientifiques, les conditions climatiques (précipitation de pluie, ensoleillement, vent, ...) et environnementales (végétation et nature du sol) qui sont susceptibles d’influencer les performances énergétiques d’un échangeur horizontal.

2.4.2.1 Conditions climatiques

Tout d’abord, Li et al [Li09] avec une étude expérimentale en Chine, montrent que les conditions climatiques et géographiques affectent le niveau de performance des échangeurs horizontaux. Gan [Gan15], faisant suite à des études numériques, met en évidence l’impact significatif de l’interaction atmosphère-sol (température de l’air, pression atmosphérique, vitesse du vent, rayonnement solaire, couverture nuageuse et précipitation de pluie) sur les performances énergétiques d’un échangeur horizontal. Négliger l’interaction atmosphère-sol implique une surestimation des transferts thermiques dans le sol.

De plus, les transferts thermiques dans le sol sont influencés par sa teneur en eau. Une représentation adéquate de la dépendance de la teneur en eau sur les propriétés thermiques du sol est nécessaire pour une bonne prédiction des résultats numériques [Gao16]. Par exemple, un échangeur eau-sol extrait 20 Wh.m^{-1} de chaleur dans un sol pour une teneur en eau de 22 %. Si celle-ci augmente à 30 % alors l’énergie extraite par l’échangeur augmente de 10 % [Gan17]. Leong [LTA98] précise ce constat avec un modèle numérique 2D d’un échangeur horizontal couplant les problèmes de transferts de chaleur et de masse. Un taux d’humidité supérieur à 25 % permet d’obtenir des performances nettement améliorées. En revanche, le taux d’humidité aura peu d’influence sur les performances de l’échangeur lorsque ce taux dépasse 50 %. Expérimentalement, Ascion et al. [ABM11] concluent à une meilleure performance énergétique pour un sol humide et avec un échangeur horizontal d’une longueur de 50 m enfoui à une profondeur de 3 m. Ce gain de performance avec un sol humide peut s’expliquer par les résultats de Balghouthi et al. [Bal05]. Ils étudient expérimentalement le comportement thermique du sol en fonction de son état d’humidité (humide ou sec). Le sol amortit moins les sollicitations thermiques avec un sol humide. Ainsi, le gradient de température au voisinage de l’échangeur est beaucoup plus grand. Les échanges de chaleur entre le fluide de l’échangeur et le sol sont de meilleures qualités.

2.4.2.2 Conditions environnementales

Grayson [Gra97] étudient aussi les facteurs pouvant affecter la variabilité spatiale de la teneur en eau dans le sol. Ceux-ci sont désignés comme étant la végétation [TT05], le climat [Teu07], les propriétés hydrauliques du sol [Ver07], la topographie [Gra97] et l’humidité antérieure du sol par Ivanov [Iva10]. Ce dernier suggère que le profil de la

teneur en eau d'un sol est différent si son humidité augmente ou diminue. Les conditions de précipitation de pluie, la présence de végétation à la surface du sol et ses propriétés hydrauliques déterminent le profil de la teneur en eau lorsque la teneur en eau augmente. Dans le cas inverse où la teneur en eau diminue, c'est l'évapotranspiration (quantité d'eau transférée vers l'atmosphère par évaporation au niveau du sol et par les plantes) qui dicte son profil de teneur en eau.

Bilan

Les différentes études scientifiques présentées s'intéressent fortement à la teneur en eau dans le sol et suggèrent qu'elle puisse améliorer significativement les performances énergétiques d'un échangeur horizontal. Cette influence significative s'explique par l'augmentation de la conductivité thermique du sol et améliorant par conséquent ses performances énergétiques [Sal06 ; TB93 ; Go15]. Cette variabilité de la conductivité thermique du sol peut être importante. Par exemple, en Indiana (USA), la fluctuation de l'humidité du sol entraîne une variabilité moyenne de la conductivité thermique de 27 % [NEG15].

Dans la prochaine partie, une étude bibliographique plus approfondie est présentée sur les facteurs favorisant une meilleure conductivité thermique et plus globalement les propriétés thermo-physiques d'un sol.

2.4.3 Les propriétés thermo-physiques du sol

Les différentes études analytiques, numériques et expérimentales présentées auparavant ont révélé le rôle significatif des propriétés thermo-physiques du sol autour des tubes d'un échangeur horizontal sur ses performances énergétiques. Cette partie consiste à réaliser un état de l'art des facteurs ou paramètres pouvant influencer les propriétés thermo-physiques (conductivité thermique λ [$W.m^{-1}.K^{-1}$], masse volumique ρ [$kg.m^{-3}$], capacité thermique massique c [$J.kg^{-1}.K^{-1}$] et diffusivité thermique D [$m.s^{-2}$]) d'un sol.

Le rapport de Kersten [Ker49] recueille une importante quantité d'informations sur les propriétés thermo-physiques pour une variété de sols et des matériaux isolants. L'objectif de cette étude est de « *déterminer sous différentes conditions de températures, d'humidités, de densités, et de natures, les propriétés thermiques de sols et de matériaux organiques provenant de l'Alaska* ». Kersten a élaboré des essais expérimentaux visant à définir l'influence des différentes conditions citées précédemment sur la conductivité thermique λ , la capacité thermique massique c , et, par calcul, la diffusivité thermique D . Par la suite, d'autres études [GL85 ; BM89 ; Uso96 ; AKR01 ; KS03 ; Abu03 ; Uso13] valident, étayent, et approfondissent les différentes conclusions observées. Celles-ci sont récapitulées dans le tableau 2.2 et explicitées ci-après.

Paramètres	Conductivité thermique λ [$W.m^{-1}.K^{-1}$]	Capacité thermique massique c [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]	Capacité thermique volumique ρc [$J.m^{-3}.K^{-1}$]	Diffusivité thermique D [$m.s^{-2}$]
Texture	↗ [Ker49]	×		
Teneur en eau ω	↗ voir (1)	↗ [Ker49] [Abu03]		↗↘ [Ker49] [GL85] [Uso96]
Masse volumique ρ	↗ [Ker49] [AKR01]	×		↗ [Ker49]
ω et ρ			↗ [KS03] [Abu03]	
Température T	↗ [BM89]	↗ [Ker49]		×
Durée t	↗ [Ker49] [BM89]			

(1) : [Ker49] [GL85] [BM89] [Uso96] [AKR01] [KS03] [Uso13]

Méthode de lecture du tableau (exemple) :

L’augmentation du paramètre T augmente (↗) le paramètre λ , d’après [BM89]

Légende :

↗ : augmentation × : aucun impact significatif

Tableau 2.2 – Récapitulatif de l’impact d’une augmentation de valeur d’un paramètre sur les propriétés thermiques de sols selon différentes références.

2.4.3.1 Conductivité thermique

Tout d’abord, le premier paramètre sensible concerne la *conductivité thermique* d’un sol. Celle-ci dépend essentiellement de la densité, de la teneur en eau (voir la figure 2.14) et de la texture du sol. Elle est plus influencée par la densité que par la teneur en eau [LUF07]. En outre, Krishnaiah [KS03] observe expérimentalement que la diminution de la conductivité thermique engendre une diminution de la masse sèche. Une étude numérique de Cote [CK08] modélise la structure d’un sol et réalise des simulations pour observer l’influence des espaces de vide sur la conductivité thermique. Lorsque les espaces de vide augmentent dans un sol, la conductivité thermique varie. Ce phénomène est encore plus marqué pour une structure de sol friable. Il montre aussi que le type de fluide présent dans les espaces vides influence sur la conductivité thermique. Ainsi, la présence d’eau améliore la conductivité thermique et à contrario, l’air provoque une diminution. Par ailleurs, Salomone [SKK84], dans son étude expérimentale avec 80 mesures de conductivité thermique de sol réalisées pour des densités et des teneurs en eau différentes, explique la possibilité de maximiser la valeur de la conductivité thermique d’un sol pour une teneur en eau et une densité optimale.

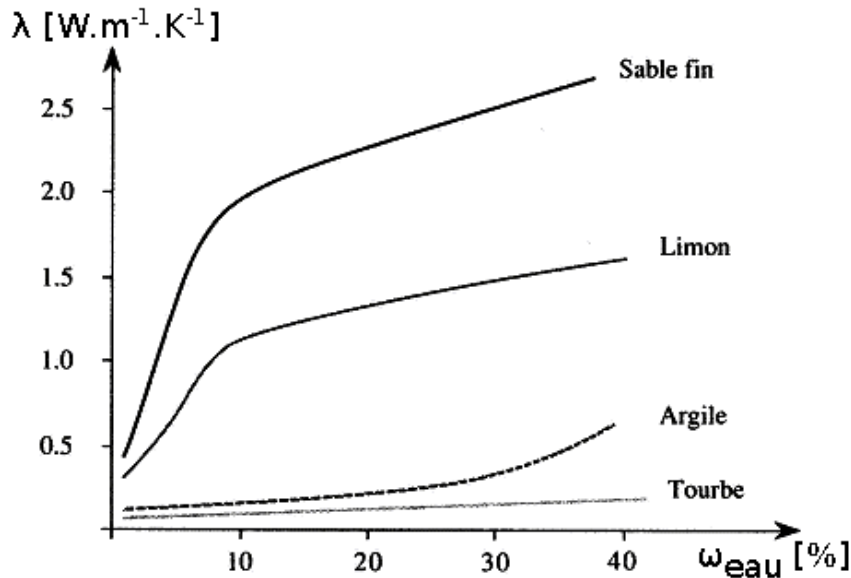


Figure 2.14 – Représentation graphique de la conductivité thermique de différents sols en fonction de la teneur en eau [Hol02].

2.4.3.2 Capacité thermique massique

Le deuxième paramètre sensible est la capacité thermique massique. Elle est sensible à la température, à la teneur en eau mais ne dépend pas de la densité du sol, de la composition des minéraux, de la taille et de la forme des grains. Lipiec [LUF07] précise que la chaleur thermique est plus sensible à la teneur en eau que de la densité du sol.

2.4.3.3 Diffusivité thermique

Le troisième paramètre concerne la diffusivité thermique. Celle-ci n'est pas influencée ni par la température ni par la masse sèche du sol [KS03] mais dépend essentiellement de la densité et de la teneur en eau. La variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur en eau diffère selon le type de sol. Pour du sable, la variation est croissante jusqu'à un maximum puis diminue légèrement alors que pour le cas de l'argile, la variation est strictement croissante [Abu03].

Bilan

En résumé, les différentes études concordent sur un point : la dépendance entre les propriétés thermo-physiques du sol (λ , c , ρ et D), la teneur en eau (ω) et la densité du sol (ρ). La majorité des études portent sur le sujet de l'impact de la teneur en eau sur la conductivité thermique. L'augmentation de la teneur en eau dans le sol engendre une augmentation de la conductivité thermique favorisant l'extraction de la chaleur par un échangeur air-sol.

2.5 Bilan du chapitre

Depuis le développement des premières modélisations des échangeurs horizontaux jusqu’à aujourd’hui, la communauté scientifique s’est rendu compte de la complexité des transferts thermiques dans le sol. En effet, les différentes études montrent un intérêt majeur à caractériser au mieux les propriétés thermo-physiques du sol en tenant en compte de sa variabilité dans le temps, de sa profondeur, des conditions météorologiques et géologiques. Les modèles de transferts de masse et de chaleur dans le sol sont de plus en plus sophistiqué, mais comportent le principal inconvénient de disposer de ressources importantes et de longs temps de calcul.

La suite de ce manuscrit s’efforce d’enrichir les informations concernant la variabilité des propriétés thermo-physiques avec la conception de deux dispositifs expérimentaux. Le premier dispositif consiste à analyser le *profil vertical de teneur en eau d’un sol sous l’influence de la précipitation de la pluie*. Le deuxième concerne l’étude des *propriétés thermo-physiques d’un sol sous l’influence de son type, de son degré de saturation et de sa charge verticale*. Ensuite, une étude numérique à partir d’une modélisation numérique transitoire par éléments finis est menée pour étudier les performances énergétiques d’un échangeur horizontal sous l’influence de conditions climatiques et géologiques.

Étude de l'humidité du sol sous l'influence de la pluie

3.1 Contexte et objectifs

Le chapitre précédent présente les facteurs pouvant influencer les performances énergétiques d'un échangeur de surface en particulier le paramètre de la teneur en eau du sol [Bal05 ; Moh15 ; Gao16]. Par conséquent, dans ce chapitre, le profil vertical de teneur en eau du sol in-situ sous l'influence de la précipitation de la pluie est étudié.

L'interaction de la précipitation de pluie entre l'atmosphère et le sol s'étudie dans les sciences du sol [Del10]. Sassenave [Sas82] conçoit un mini-simulateur de pluie avec des parcelles de terrains différents afin d'étudier l'hétérogénéité du sol, la couverture végétale du sol, la pluie d'imbibition, l'intensité limite de ruissellement et la rétention superficielle. Le laboratoire de l'INRA d'Orléans dispose d'un simulateur de pluie qui crée artificiellement de la pluie en conditions contrôlées sur une surface au sol de 1 dm^2 à 10 m^2 . Ils étudient le ruissellement de l'eau à la surface du sol, l'infiltration de l'eau et l'état de surface du sol selon différentes conditions pluviométriques. Les transferts d'eau au sein des sols non saturés peuvent être décrits par l'équation de Richards [NB12 ; Bel13] qui découle de l'application des équations de conservation de masse et de la loi de Darcy sous l'hypothèse d'indéformabilité du massif [DC00]. La résolution numérique de cette équation est satisfaisante. Elle modélise les infiltrations de l'eau dans les massifs compactés. La difficulté réside dans la caractérisation des propriétés hydriques d'un sol non-saturé qui sont définies par Van Genuchten [Gen80]. La détermination de la perméabilité à l'eau d'un sol non saturé requiert des dispositifs sophistiqués et peu répandus ainsi que l'utilisation de la méthode de Gardner [Gar58] ou de Corey [RJ71].

L'objectif de ce chapitre est d'étudier la teneur en eau d'un **sol in-situ** sous l'influence de différents scénarios de précipitation de pluie. La mise en place d'un dispositif expérimental évalue la teneur en eau d'un sol en fonction de la profondeur et du type de sol selon des données pluviométriques.

Les étapes pour réaliser cette étude sont les suivantes :

1. la *conception, élaboration, instrumentation et validation* d'un dispositif expérimental étudiant le comportement hydrique d'un sol soumis à différentes conditions pluviométriques ;
2. la définition de profils pluviométriques in-situ ;

3. la réalisation d'une campagne d'essais avec un sol utilisé typiquement pour les échangeurs air-sol ;
4. la détermination de la variabilité de la teneur en eau du sol à une profondeur z donnée et à un temps t donné.

Les résultats obtenus enrichiront les informations d'humidité du sol autour de l'échangeur expérimental avec une meilleure précision. Actuellement, les capteurs mesurent la *teneur en eau du sol à l'interface entre le lit de pose et du sol d'enrobage* à une profondeur de l'ordre du mètre. Une corrélation entre les données expérimentales en laboratoire et les mesures in-situ permettra d'augmenter les connaissances sur le comportement hydrique du sol jusqu'à l'échangeur et ainsi mieux comprendre la variation des performances énergétiques d'un échangeur air-sol sous l'influence de conditions pluviométriques.

3.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental a pour objectif d'étudier la variabilité de la teneur en eau d'un sol en fonction de conditions pluviométriques. Ce dispositif est réalisé au sein de notre laboratoire situé à l'IUT Robert Schuman au département Génie Civil. Toutes les étapes de *conception, d'élaboration, d'instrumentation et de validation* sont *pensées, exécutées et accomplies sur site*.

3.2.1 Cahier des charges

Le simulateur de pluie est conçu de manière à répondre à deux problématiques. Premièrement, il doit simuler des conditions pluviométriques **réelles in-situ**. Deuxièmement, il doit assurer la mesure du profil de teneur en eau sur une profondeur correspondant à la **profondeur d'enfouissement d'un échangeur air-sol**.

Tout d'abord, il est nécessaire de préciser le paramètre à mesurer qui est la teneur en eau du sol. Celle-ci dépend de la nature du sol et de la masse d'eau. Deux approches sont possibles pour la mesurer, voir la figure 3.1 : une approche locale (1) en mesurant la teneur en eau du sol avec des capteurs, ou une approche globale (2) en quantifiant la masse d'eau dans le sol. L'approche globale assure une bonne précision de la masse d'eau contenue le sol, mais l'inconvénient est le manque d'informations sur le profil vertical d'humidité du sol. C'est pour cette raison que l'**approche locale** est **retenue**.

Le cahier des charges du dispositif expérimental se répartit en trois parties :

- la *géométrie* du dispositif ;
- la régulation des *conditions de pluie* dans un circuit d'eau fermé ;
- l'*instrumentation* avec un système d'acquisition gérant l'enregistrement des mesures et de pilotage contrôlant les conditions pluviométriques.

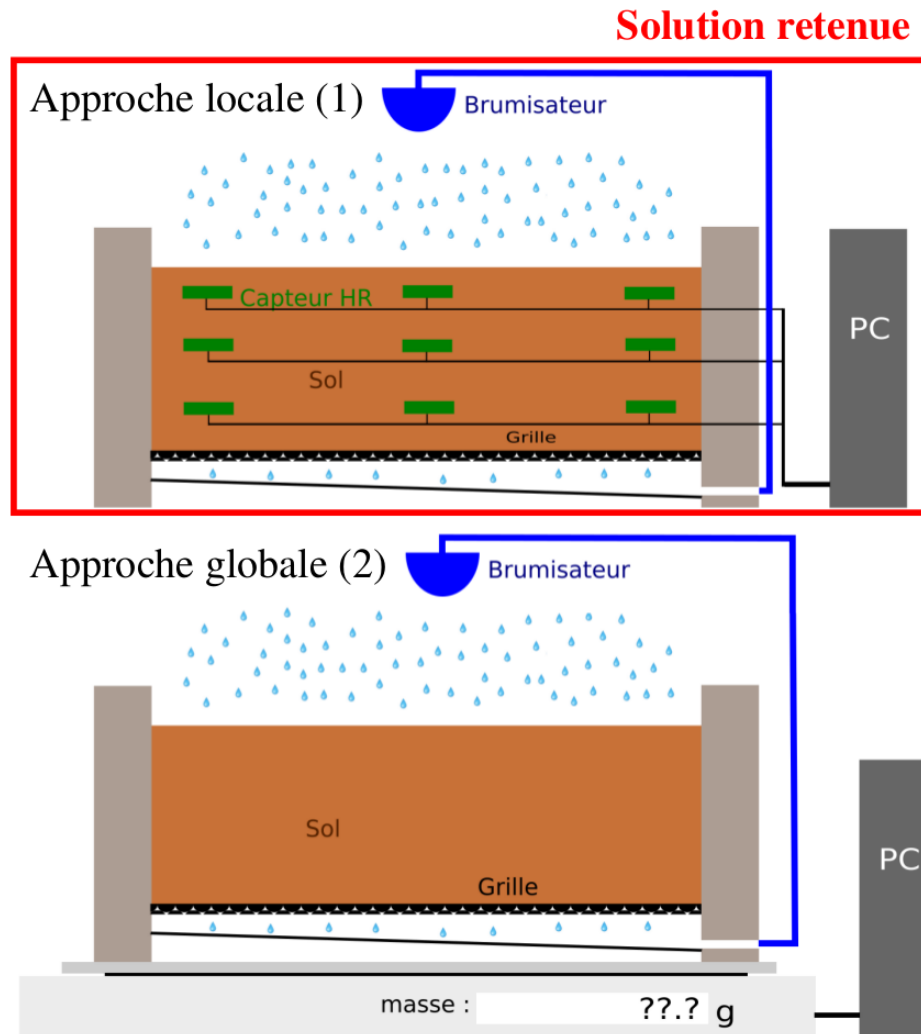


Figure 3.1 – Propositions de solutions pour la mesure de la teneur en eau dans le sol. Approche locale (1) : mesure avec des capteurs d’humidité du sol. Approche globale (2) : mesure de la quantité d’eau dans le sol.

3.2.2 Géométrie du dispositif

Le souhait de reconstituer la **profondeur de sol in-situ** en laboratoire impose la hauteur du dispositif. Pour assurer une mesure sans interaction environnementale, les capteurs nécessitent un **volume minimum** de $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$ de sol. Pour minimiser les **effets de bords**, **trois capteurs** sont positionnés sur une même profondeur.

Ces critères imposent une géométrie du dispositif parallélépipédique avec une hauteur de $1,40 \text{ m}$ et une base rectangulaire de 60 cm par 30 cm . Le dessin technique du dispositif expérimental est présenté sur les figures 3.2 et 3.3. Pour des raisons de conception, il est construit en bois et étanche à l’eau par un film plastique.

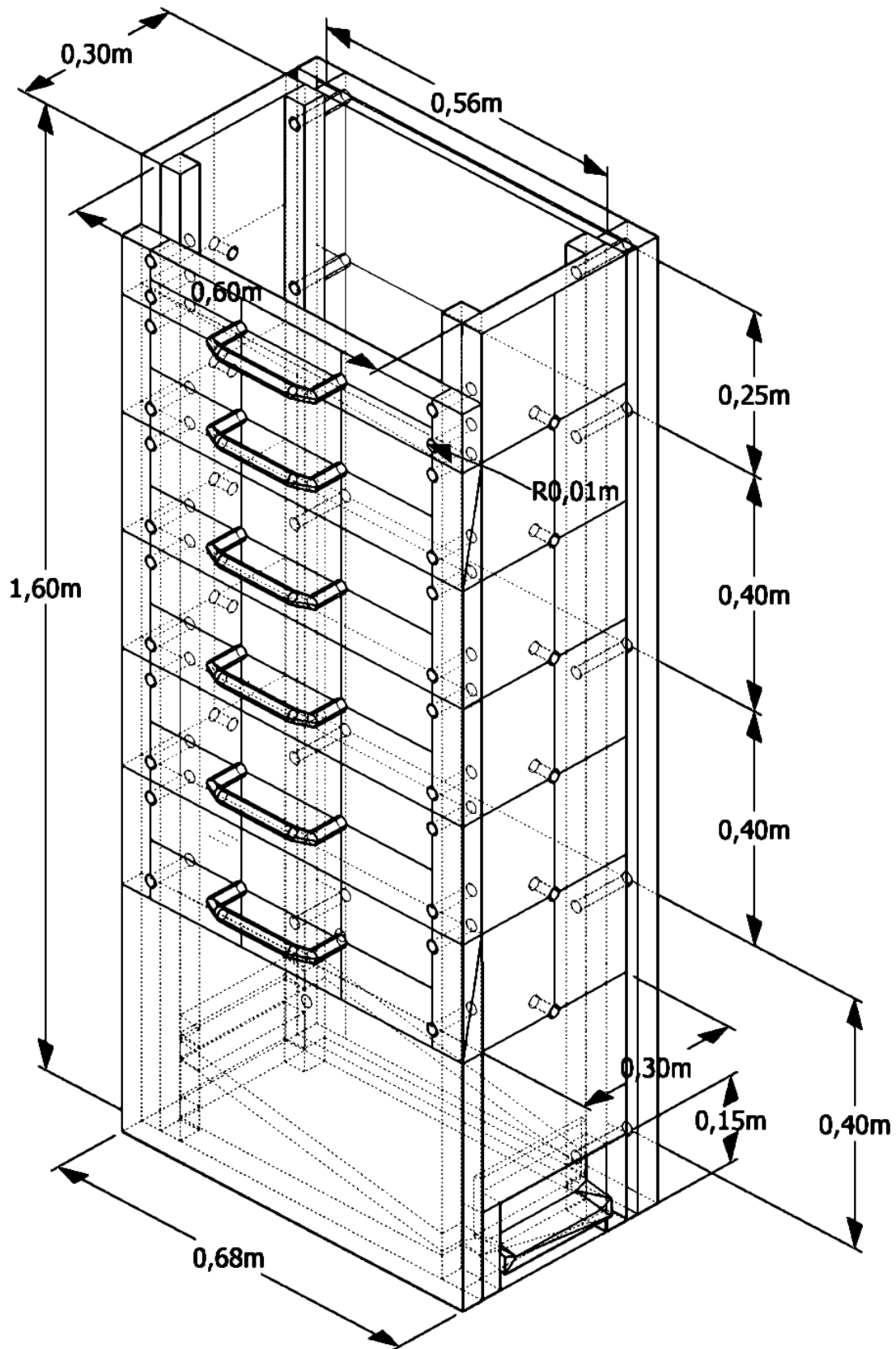


Figure 3.2 – Perspective isométrique du dispositif expérimental avec ses plans techniques (voir figure 3.3).

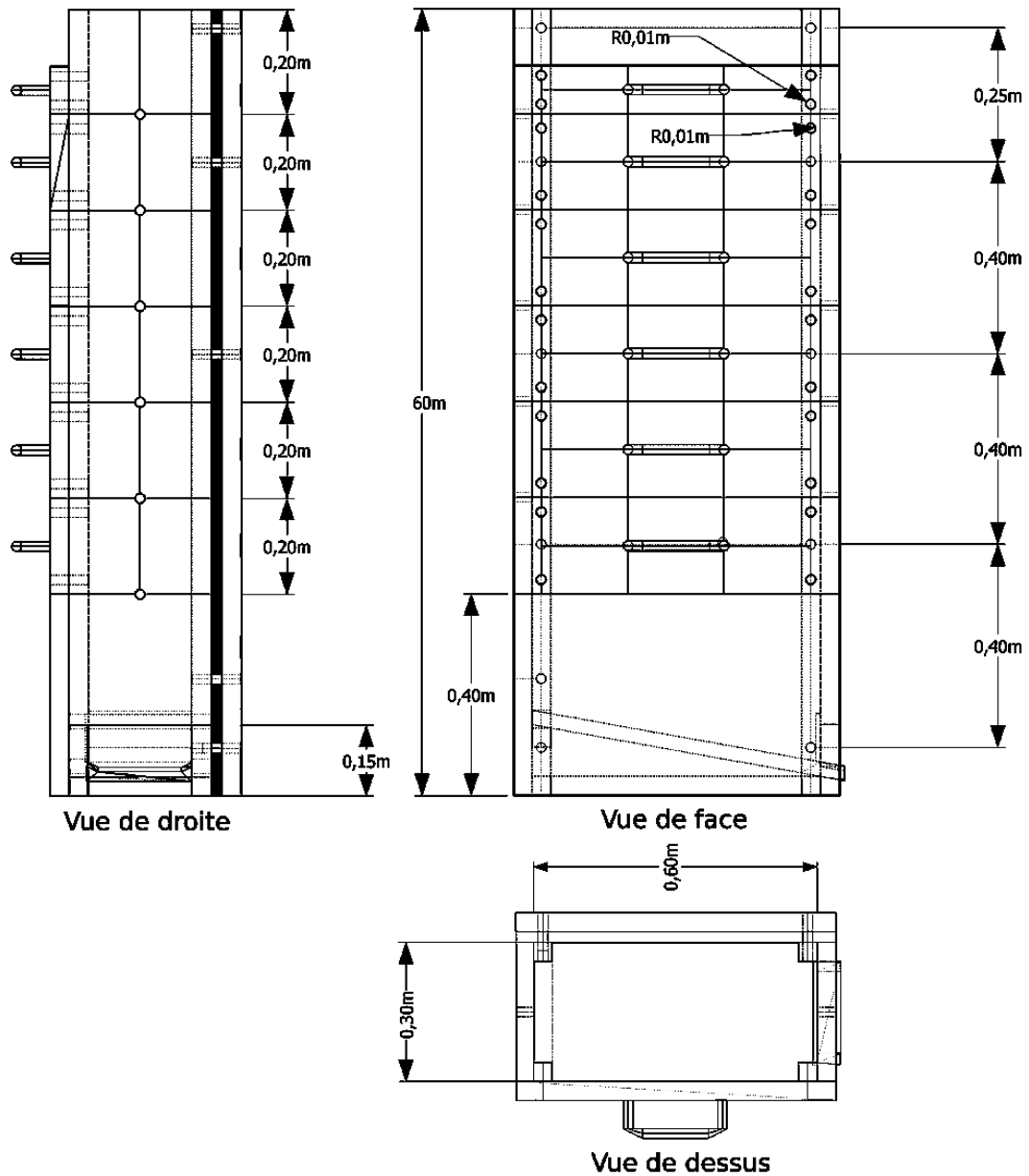


Figure 3.3 – Plans techniques du dispositif expérimental.

3.2.3 Régulation du simulateur de pluie

Pour répondre aux consignes de précipitation en $[mm/h]$, le dispositif nécessite un simulateur de pluie assurant la "création" de pluie. Ce système se compose d'une plaque de *plexiglas®* horizontale (figure 3.4). Cette dernière comprend des orifices variables en nombre et en diamètre pour obtenir différentes intensités de précipitation. L'arrivée de l'eau dans le simulateur de pluie est assurée par une pompe. Celle-ci est contrôlée par un système de pilotage en fonction de la consigne de précipitation. Afin de vérifier la consigne, un débitmètre mesure le débit d'eau du simulateur de pluie. L'ensemble du dispositif expérimental est présenté par les figures 3.4 et 3.5.

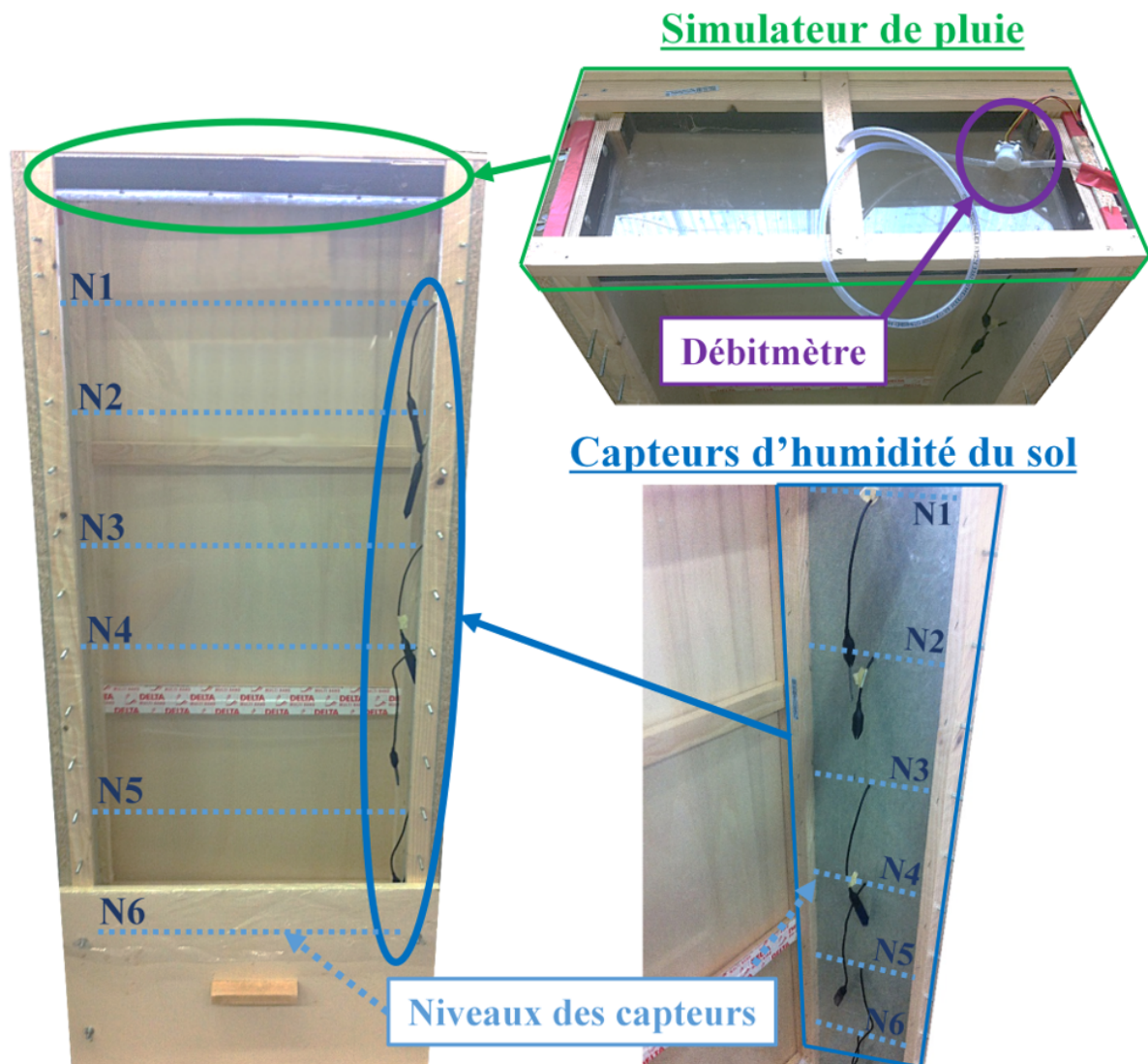


Figure 3.4 – Présentation du dispositif expérimental avec le simulateur de pluie et le positionnement des capteurs d'humidité du sol par niveaux (N).

3.2.4 Instrumentation

Le dispositif est instrumenté par des capteurs d'humidité du sol, un débitmètre et des capteurs de niveaux d'eau.

Capteurs d'humidité du sol

Les capteurs d'humidité sont placés sur six niveaux (N) et peuvent être positionnés à trois emplacements différents : à gauche (a), au milieu (b) et à droite (c). Chaque niveau se délimite par le plan horizontal imposé par un tiroir, voir les figures 3.4 et 3.5.

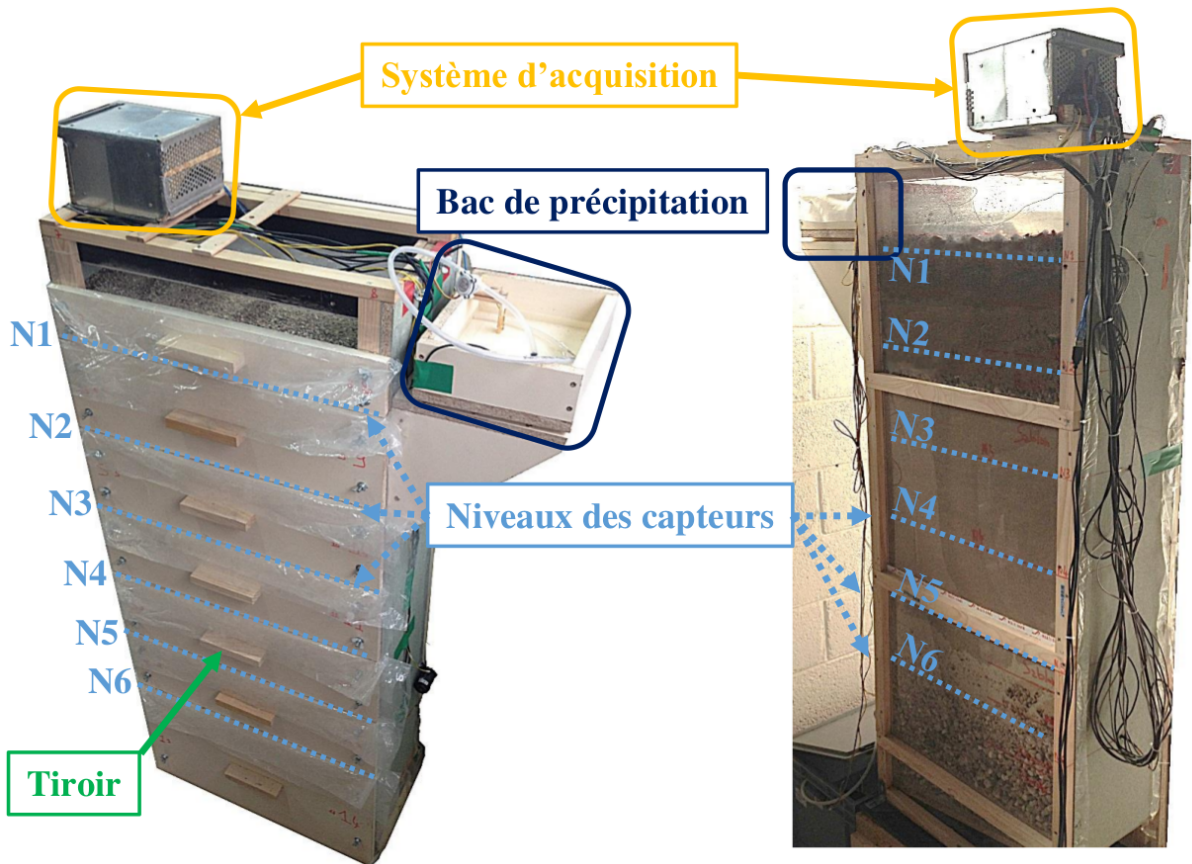


Figure 3.5 – Présentation du dispositif expérimental avec les principaux éléments : le système d'acquisition des données, le circuit d'eau fermé, les tiroirs délimitent un plan horizontal (niveau) pour le positionnement des capteurs d'humidité du sol.

Trois types de capteurs sont utilisés, présentés par la figure 3.6 et récapitulés dans le tableau 3.1, leurs caractéristiques sont les suivantes :

- les capteurs SM100 : capteurs capacitifs de la marque *WATERSCOUT*, délivrent une tension croissante avec l'augmentation de l'humidité du sol ;
- les capteurs Gravity SEN0193 : capteurs capacitifs de *DFRobot*, délivrent une tension décroissante avec l'augmentation de l'humidité du sol ;
- les capteurs Gravity SEN0114 : capteurs résistifs de *DFRobot*, délivrent une tension parabolique avec l'augmentation de l'humidité du sol.

Le capteur capacitif d'humidité du sol repose sur la mesure de la permittivité diélectrique relative du sol à l'aide d'un pont capacitif ou d'un circuit électronique résonnant. Cette permittivité diélectrique relative est très sensible à la teneur en eau du sol dans la gamme de fréquence comprise entre 1 et 100 *MHz*. Elle est égale à 80 pour l'eau, de 2 à 7 pour les constituants solides d'un sol et à 1 pour l'air. Par ailleurs, la constitution d'un sol se représente par un système triphasique composé d'un solide présentant des pores occupés par des gaz et/ou des fluides. Son comportement diélectrique global dépend essentiellement de l'eau. Les changements de teneur en eau peuvent être détectés par le

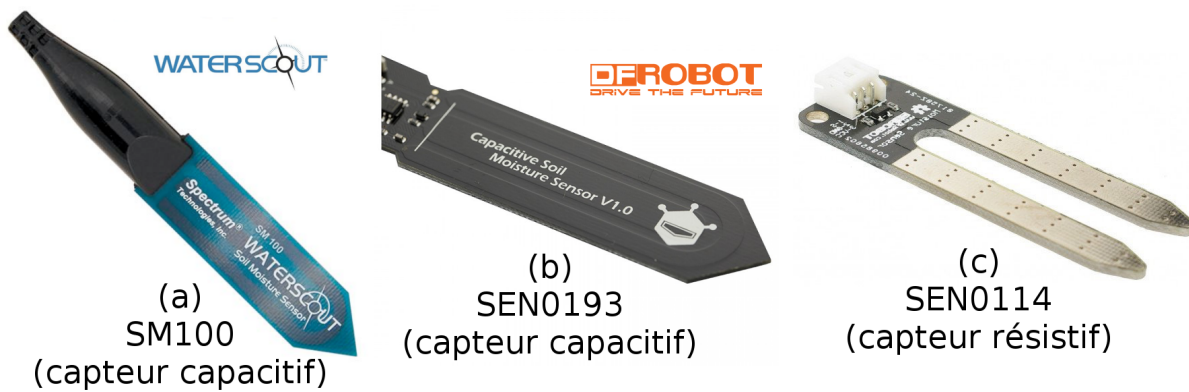


Figure 3.6 – Illustrations des différentes sondes : (a) SM100, (b) SEN0193 et (c) SEN0114.

capteur capacitif et être corrélés à la teneur en eau du sol.

Le capteur résistif repose sur le principe de la conduction électrique dans un milieu. Deux électrodes imposent un courant dans un sol. En raison de la bonne conduction de l'eau, la résistivité du sol varie avec sa teneur en eau. La tension aux bornes des électrodes renseigne sur son état d'humidité.

Capteur	Type	Tension de sortie		Incertitude de la mesure
		plage [V]	incertitude [mV]	
SM100	capacitif	0,5-2,5	5 [0,1 %]	1 %
SEN0193	capacitif	0-3,0	5 [0,2 %]	3 %
SEN0114	résistif	0-4,2	5 [0,1 %]	3 %

Tableau 3.1 – Récapitulatif de la métrologie du dispositif expérimental.

Avant chaque série d'essais, chaque capteur est étalonné en fonction de la teneur en eau (définie à la partie 2.4) et du sol dans lequel la mesure est réalisée. La figure 3.7 représente un exemple d'étalonnage de chaque type de capteurs à différents états d'humidité pour les deux campagnes d'essais. Il est à noter que les fonctions de sortie pour les deux types de capteurs capacitifs (SM100 et SEN0193) ne sont pas les mêmes à cause de **la logique de mesure des circuits électroniques**. Les capteurs capacitifs SM100 délivrent une tension croissante avec l'augmentation de l'humidité du sol alors que ceux SEN0193 réagissent inversement (une tension qui décroît avec l'augmentation de l'humidité du sol). Concernant le capteur résistif SEN0114, on remarque que la fonction de la tension de sortie n'est pas une fonction bijective. C'est pourquoi, par la suite, les mesures relevés par ce capteur servent seulement comme un indicateur d'humidité.

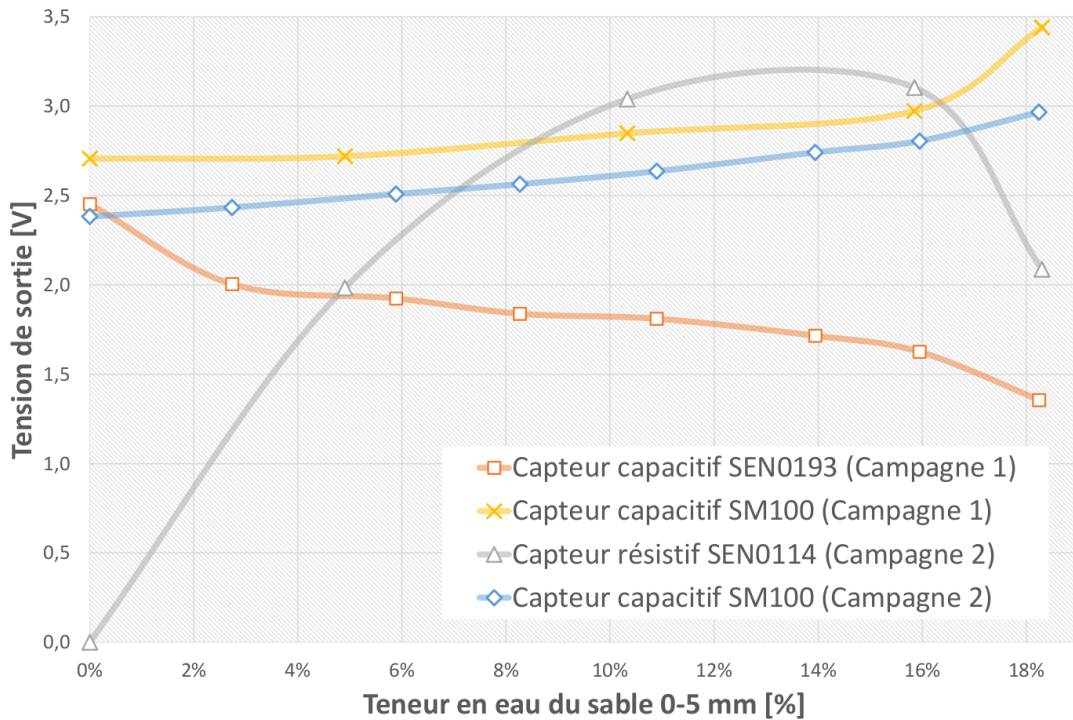


Figure 3.7 – Calibration des capteurs d'humidité du sol pour les deux campagnes d'essais.

Débitmètre

Le débitmètre est installé en amont du simulateur de pluie. Il mesure le débit d'eau en entrée du dispositif expérimental et le volume d'eau total écoulé à travers les différentes couches de sol.

Le signal délivré par le débitmètre est une pulsation en tension. Chaque pulsation correspond à un tour de rotation. Le débitmètre se calibre en déterminant le nombre de tours de rotation sur une minute pour un volume d'eau connu. La calibration du débitmètre résulte d'une fonction linéaire du volume d'eau [l] dépendante de sa vitesse de rotation [$tr.m^{-1}$], voir figure 3.8.

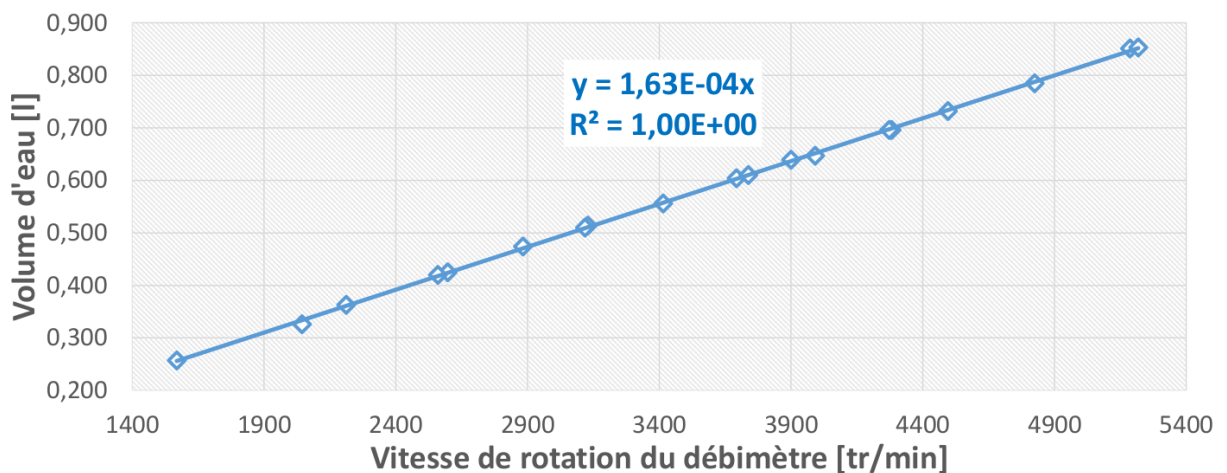


Figure 3.8 – Calibration du débitmètre.

Capteurs de niveaux d'eau

Les capteurs de niveaux d'eau, voir la figure 3.9, ne demandent pas de calibration, car ils servent de détecteur de seuil pour l'arrêt et la mise en marche des deux pompes. Ce sont des capteurs résistifs analogiques. Le principe de fonctionnement d'un capteur de niveau résistif est le pont diviseur de tension. Les différentes lamelles du circuit imprimé (en dorée sur la figure 3.9) sont assimilés à une résistance électrique. Avec la montée du niveau d'eau, le circuit électrique se ferme et la résistance électrique du capteur varie. Cette variation de résistance électrique permet de détecter le niveau de l'eau.



Figure 3.9 – Capteur de niveau d'eau.

Systèmes de pilotage et d'acquisition

Les systèmes de pilotage et d'acquisition sont réalisés par une carte *Arduino Mega*. Les tensions sont mesurées par les ports analogiques pour une résolution de 12 *bits* entre 0 et 5 V soit une sensibilité de 1 *mV*. A cause des fonctionnalités du programme informatique, l'intervalle minimum d'acquisition est de 5 *secondes*.

Une interface graphique pour l'utilisateur (*Graphic User Interface*, **GUI**) développé dans le langage *Processing*, voir la figure 3.10, permet de visualiser les mesures des dernières valeurs acquises. Chaque capteur y est représenté en fonction de son emplacement dans le sol. Les valeurs mesurées sont affichées sous une représentation graphique en fonction du temps avec une mémoire de 15 *minutes*. Cette interface contrôle aussi la consigne de précipitation soit par une saisie manuelle (*Saisie*) soit par la lecture d'un fichier de consigne (*Fichier*).

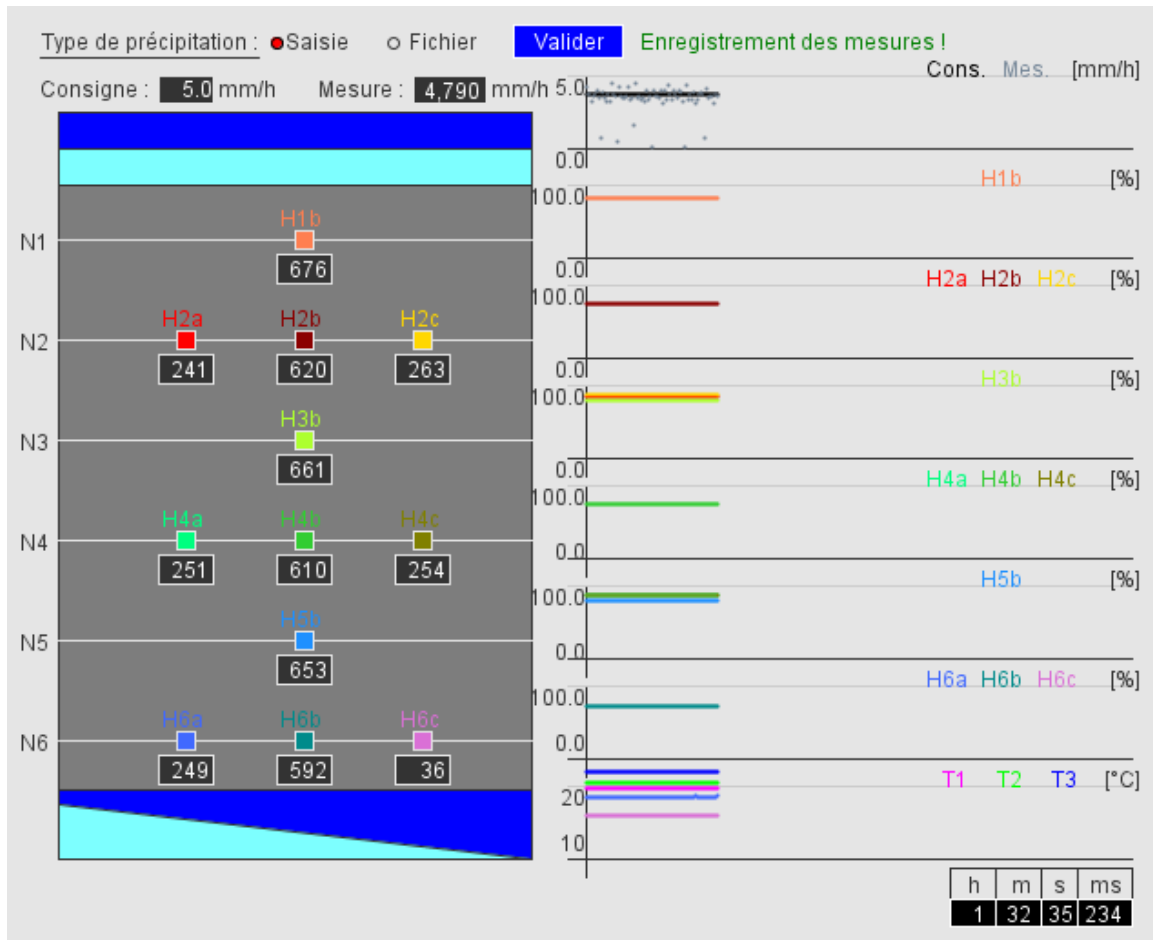


Figure 3.10 – Interface graphique pour piloter l’intensité pluvieuse et acquérir les mesures.

3.3 Définition des profils de précipitation de pluie

Le but du dispositif expérimental est de déterminer le profil vertical de teneur en eau représentatif des conditions pluviométriques réelles. Dans ce contexte, il est nécessaire de définir des profils de précipitation de pluie en lien avec les **mesures journalières de la précipitation in-situ** (voir la partie 3.3.1). Les événements pluvieux peuvent être caractérisés par un pluviogramme, hyétogramme, une hauteur totale de précipitation, une intensité moyenne maximale et une période de retour. Chaque caractérisation est vue en détail dans la partie 3.3.2.

Les événements pluvieux sont caractérisés par une modélisation de la courbe Intensité-Durée-Fréquence (**IDF**). Celle-ci permet de lier l’intensité et la durée d’un événement pluvieux. Ce choix se justifie par la raison suivante : les données de précipitation *ne sont pas assez précises* (mesures des précipitations **journalières** disponibles sur la plateforme géothermique) pour simuler directement les *conditions réelles des pluies in-situ*. A partir de cette modélisation, les *scénarios de précipitation expérimentale sont simulés avec une représentation statistique des pluies in-situ*. Les profils de pluie obtenus pour l’expérimentation sont présentés dans la partie 3.3.3.

3.3.1 Mesure de la précipitation in-situ

La plateforme géothermique dispose d'une station de pluviométrie sans fil, modèle RGR126N, de la marque *Oregon Scientific*, voir figure 3.11. Celle-ci dispose d'un capteur de pluviométrie PCR800 avec une vidange automatique. Sa précision est de 1 mm. Son système de mesures consiste à détecter le mouvement d'un auget à bascule dont la contenance est connue. La pluie en pénétrant dans le pluviomètre (un entonnoir la recueille) s'accumule d'un côté de l'auget. Une fois le volume d'eau suffisant, l'auget bascule de l'autre côté à cause du poids de l'eau. Une fois basculée, la pluie s'accumule sur l'autre partie de l'auget jusqu'à basculer. Et ainsi de suite ... Pour une mesure précise, la notice conseille de positionner le pluviomètre à une hauteur de 1,5 m, à l'abri de la lumière directe du soleil et de l'humidité. Suivant ces conseils, le pluviomètre est placé sur l'entrée de l'échangeur air-sol expérimental.

Pour des raisons de compatibilité, le pluviomètre n'est pas raccordé à la centrale d'acquisition de la plateforme géothermique. Une station de pluviométrie relève **quotidiennement** l'intensité pluvieuse avec un historique de 9 jours. La figure 3.12 représente les données journalières recueillies entre août 2013 et février 2017.



Figure 3.11 – Photo du pluviomètre.

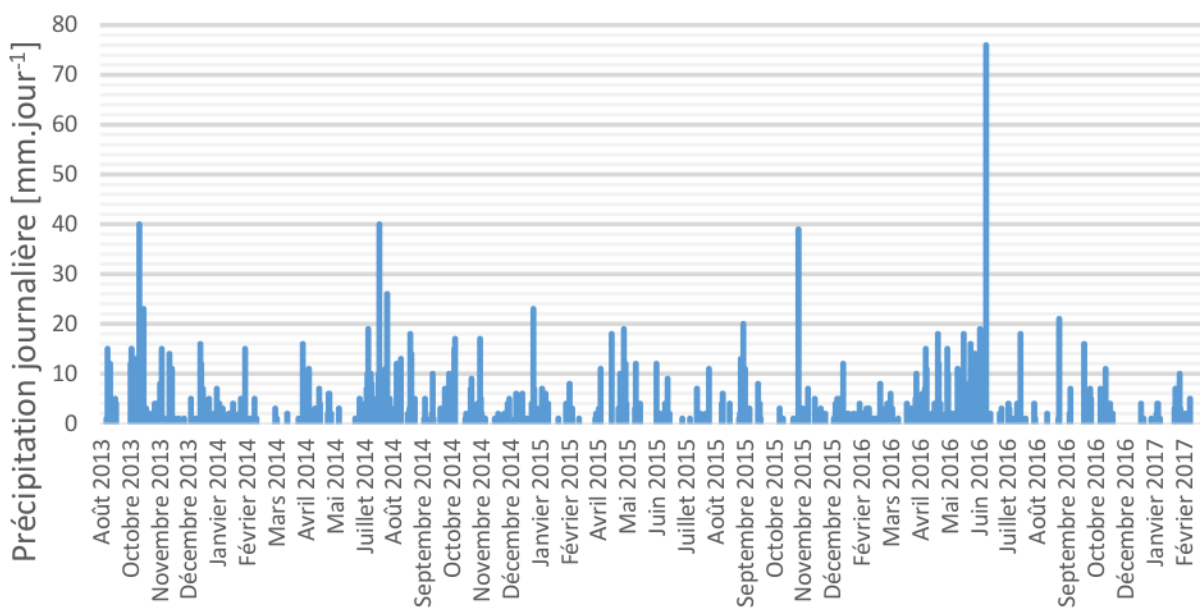


Figure 3.12 – Précipitation journalière sur la plateforme géothermique.

La représentation temporelle de la précipitation journalière renseigne sur la tendance du volume de pluie selon la saison. Pour que l'essai en laboratoire soit représentatif des cas réels, il est utile de connaître la répartition statistique de la précipitation journalière, voir la figure 3.13. Les événements pluvieux sur le site sont globalement de faibles intensités. Les pluies avec une précipitation journalière inférieure ou égale à 10 mm.jour^{-1} représentent 85 % de l'ensemble des précipitations journalières.

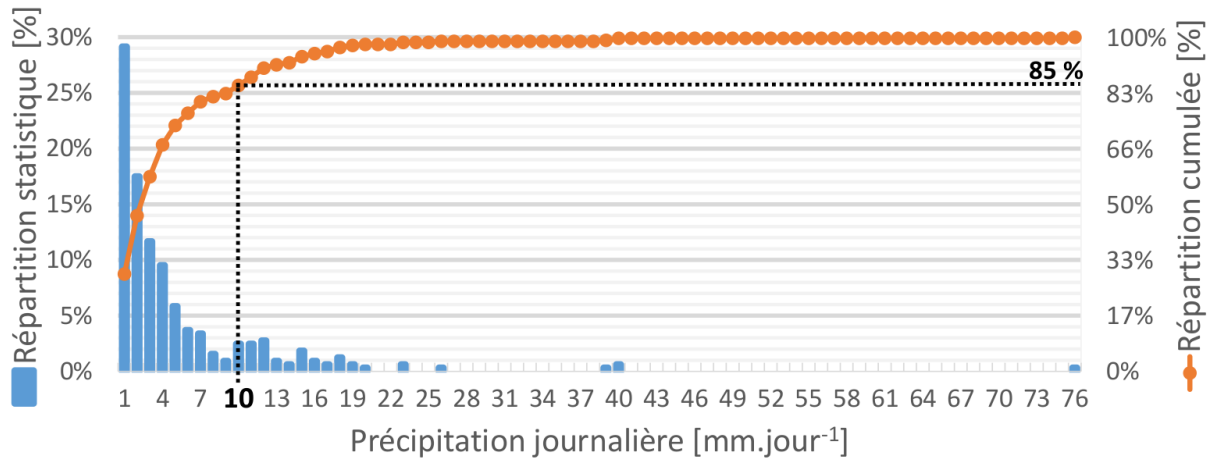


Figure 3.13 – Répartition statistique de la précipitation journalière entre août 2013 et février 2017.

3.3.2 Caractérisation des conditions pluviométriques locales

L'observation de la pluie permet de caractériser les événements pluvieux en constituant des séries chroniques pluviométriques, en déduisant par méthodes statistiques des lois caractéristiques, et en construisant des profils types de pluie. La direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature, dans sa fiche sur les conditions pluviométriques locales [Log14], décrit comment analyser les données pluviométriques pour la réalisation d'un dossier définissant les rejets d'eau pluviale. On s'appuie sur ces informations pour caractériser la précipitation de la pluie in-situ.

Les événements pluvieux sont caractérisés par :

- un **pluviogramme** : évolution de la hauteur de pluie cumulée en fonction du temps $H(t)$ mesurée à pas de temps constant ;
- un **hyétoqramme** : évolution de l'intensité de la pluie au cours du temps $i(t)$ permettant de visualiser l'intensité maximale avec un pas de temps constant ;
- une **hauteur totale de précipitation** HT : ou cumul d'eau, ce paramètre correspond à la quantité d'eau par unité de surface. Il est exprimé en mm et 1 mm de pluie est équivalent à 1 litre sur une surface de 1 m^2 ;
- une **intensité moyenne maximale** sur différentes durées caractéristiques : c'est

le rapport entre la hauteur de pluie et la durée de précipitation. Elle s'exprime soit en $mm.h^{-1}$ soit en $mm.min^{-1}$ et se définit par $i_{moy} = \frac{HT}{DT}$.

Ces caractérisations nécessitent un relevé de mesures avec un faible pas de temps. Par exemple, *MétéoFrance* réalise un enregistrement avec un pas de temps minimum de 6 *minutes*. Ces caractérisations définissent des événements pluvieux locaux sur un temps court par rapport à l'échelle d'une année complète. Pour définir des profils de pluie représentatifs, il est nécessaire de prendre en compte les événements pluvieux ponctuels dans une approche de temps plus importante.

La notion de *période de retour* associe ces événements ponctuels dans une analyse pour une période annuelle, décanale, centenaire, ... La caractérisation **Intensité-Durée-Fréquence** inclut cette notion et traduit l'évolution de l'intensité moyenne maximale (i) de la pluie en fonction de la durée (DT) de l'événement pluvieux et de la période de retour (PR). Elle est généralement établie à partir de données statistiques. Celles-ci servent à définir les pluies de projet. Ce sont des *pluies fictives statistiquement équivalentes aux pluies réelles*. Cette courbe peut être modélisée par la loi empirique de Montana qui fournit pour un site d'observation, l'intensité moyenne de la pluie i sur une durée t en fonction de deux paramètres a_i et b_i , appelés aussi coefficients de Montana :

$$i(t) = a_i \cdot t^{-b_i} \quad (3.1)$$

Cette formule exponentielle conduit à des valeurs d'intensité qui tend vers l'infini si la durée tend vers zéro. La valeur de t varie généralement de 6 *min* (temps minimum entre deux mesures) et 192 *heures*. Les coefficients de Montana peuvent varier de 10 à 40 pour le coefficient a_i et de 0,6 à 0,9 pour le coefficient b_i .

La loi de Montana exprime également la hauteur de précipitation cumulée $H(t)$ au cours d'un épisode pluvieux :

$$H(t) = a_H \cdot t^{1-b_H} \quad (3.2)$$

L'intensité pluvieuse mesurée in-situ est enregistrée **quotidiennement**. Comme les durées de la plupart des pluies sont inférieures à 24 *h*, les précipitations journalières **ne suffisent pas** pour modéliser la courbe **IDF in-situ**. Nous utilisons donc les précipitations **horaires** sur la période 2006-2016 enregistrées par la station météorologique la plus proche de notre site : la station de Strasbourg-Entzheim, n°67124001. À partir de ces données, la courbe IDF est obtenue avec une durée t supérieure à 360 *s* et un retour décennal. Les coefficients de Montana sont déterminés par **résolution des moindres carrés**, voir la figure 3.14.

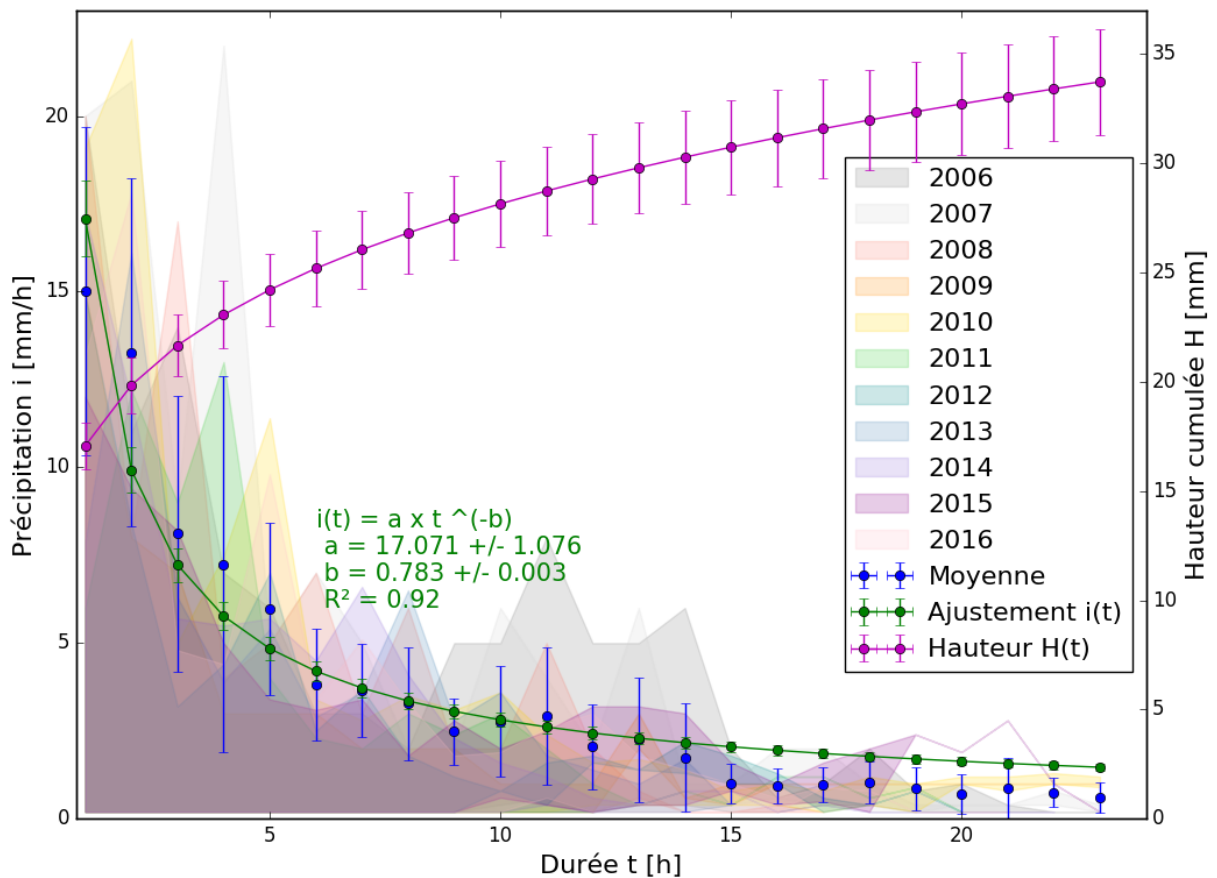


Figure 3.14 – Représentation graphique de la courbe Intensité-Durée-Fréquence obtenue à partir des données de la station météo de Strasbourg-Entzheim entre 2006 et 2016.

Cette modélisation IDF **ne correspond pas aux conditions réelles** de précipitation car sur notre site 85 % des événements pluvieux (voir la figure 3.13) ont une *précipitation journalière inférieure ou égale à 10 mm.jour^{-1}* . Cette modélisation IDF considère une hauteur cumulée de 34 mm pour une durée de 24 heures soit une précipitation journalière de 34 mm.jour^{-1} qui est beaucoup trop élevée par rapport aux précipitations in-situ.

Pour obtenir une représentation fidèle des conditions réelles, le coefficient a_i de Montana est ajusté de manière à obtenir une hauteur de pluie cumulée de 10 mm pour une durée de 24 heures. Cette nouvelle modélisation IDF, figure 3.15, définit en intensité et en durée **la majeure partie des pluies in-situ** et la plage de fonctionnement du simulateur de pluie.

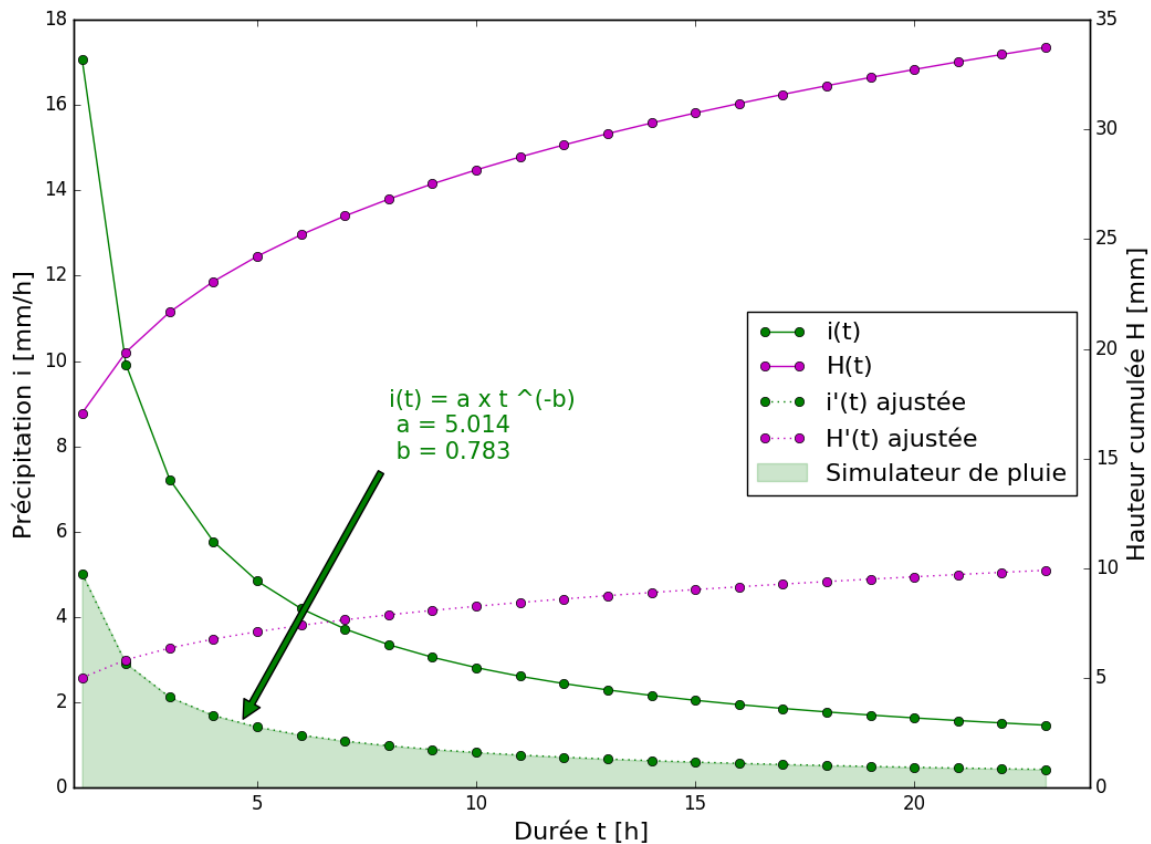


Figure 3.15 – Courbe IDF ajustée aux données de précipitations journalières in-situ.

3.3.3 Définition des profils de pluie

Cette partie a pour objectif de caractériser les événements pluvieux selon leurs intensités, leurs durées et leurs profils.

Les profils de pluie

Les profils de pluie sont définis à partir des documents de la police de l'eau et des milieux aquatiques pour la déclaration ou la demande d'autorisation de rejets d'eaux pluviales. Ces documents fixent trois profils de pluie qui sont représentés pour un même volume d'eau écoulé par la figure 3.16 :

- le profil *rectangle* : intensité de pluie constante i_r sur une durée totale DT ;
- le profil *triangle* : intensité de pluie croissante avec une pente constante jusqu'à une intensité maximale i_t puis qui décroît linéairement sur une durée totale DT ;
- le profil *double triangle* : intensité de pluie avec une double croissance (à i_{DT1} et i_{DT2}) puis de double décroissance sur une durée totale DT ;

Parmi ces trois profils de pluie, celui s'approchant le plus du simulateur de pluie est le profil *rectangle*. Les essais expérimentaux réalisés respecteront donc un profil de pluie *rectangle*.

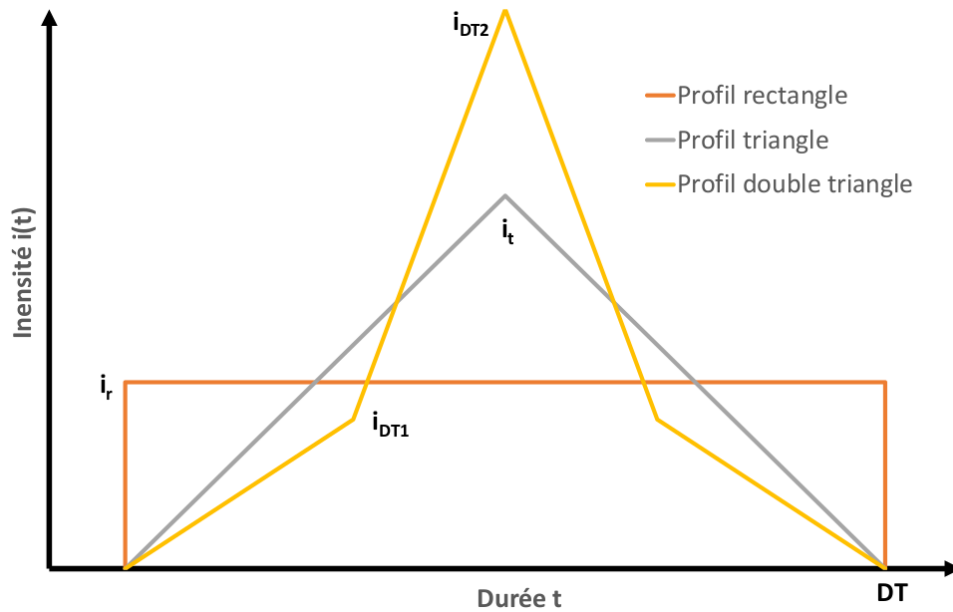


Figure 3.16 – Présentation des trois profils de pluie (rectangle, triangle et double triangle) pour un même volume de pluie.

L'intensité et la durée de la pluie

La courbe IDF ajustée aux précipitations in-situ définit la plage de fonctionnement du simulateur de pluie. La précipitation prédite par celui-ci répondra à la condition d'intensité comprise entre 0 et 5 mm.h^{-1} .

Afin d'étudier l'impact de l'intensité de pluie, deux intensités sont choisies pour chaque campagne d'essais : 2,0 et 4,0 mm.h^{-1} pour le sol uniforme ; 2,5 et 5,0 mm.h^{-1} pour le sol multicouche reconstitué du site.

Le volume total et la durée de la pluie

La durée de la pluie se détermine à partir de 3 volumes totaux de pluie définis pour chaque essai à : 10 l, 17 l et 28 l pour le sol uniforme ; 25 l, 45 l et 64 l pour le sol multicouche.

3.4 Étude expérimentale

En utilisant le dispositif expérimental présenté précédemment, deux campagnes d'essais sont réalisées avec des configurations différentes de sols. La première campagne a pour but de valider et d'étudier le comportement hydrique d'un sol homogène composé de **sable 0-5 mm**. La deuxième campagne se rapproche du cas in-situ avec une composition de plusieurs sols différents (**terre végétale, remblai, sablon et gravier**).

3.4.1 Campagne d'essais avec un sol uniforme

La première campagne d'essais, voir la figure 3.17, se compose d'un sol homogène afin de simplifier sa mise en place et d'obtenir des résultats de référence. Le choix de sable 0-5 mm s'explique, en raison de sa perméabilité à l'eau favorable à son écoulement et pour une raison pratique car ce sable est disponible dans notre laboratoire.



Figure 3.17 – Photo du dispositif expérimental avec un sol composé uniquement de sable 0-5 mm.

Positionnement des capteurs d'humidité du sol

Six capteurs capacitifs SM100 et six capteurs résistifs SEN0114 assurent la mesure de l'humidité du sol. Chaque capteur capacitif est positionné au milieu de chaque niveau. Les capteurs résistifs sont placés au bord du niveau pour un niveau sur deux. Le positionnement des capteurs est récapitulé sur la figure 3.18.

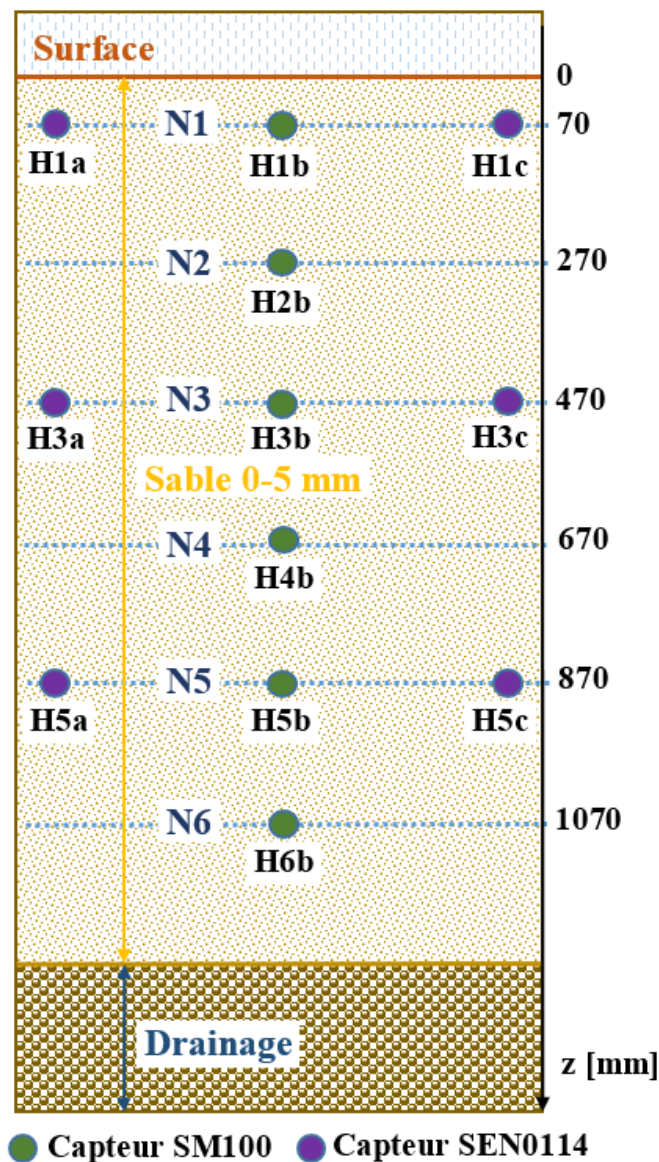


Figure 3.18 – Position des capteurs d'humidité du sol pour la première campagne d'essais.

Conditions de précipitation

Durant cette campagne, six essais sont réalisés, voir le tableau 3.2. Le premier essai a pour but d'humidifier le sol permettant d'obtenir une condition initiale du profil vertical de teneur en eau identique pour chaque essai. Pour les deux essais suivants, la teneur en eau est étudiée avec des intensités et des durées de pluies différentes. Les trois derniers essais, des cycles de pluies sont appliqués et définis comme un signal créneau. Le niveau bas correspond à l'absence de pluie et le niveau haut à la consigne de précipitation. Le rapport cyclique est de $\frac{1}{2}$ afin d'obtenir une durée d'absence et de présence de pluies identiques.

Essai n°	Type de pluie	Intensité moyenne	Durée	Volume de pluie [l]
1	humidification du sol	4,0 mm.h ⁻¹	45 min	27,8
2	pluie modérée	2,5 mm.h ⁻¹	50 min	18,7
3	pluie modérée	2,0 mm.h ⁻¹	1 h 30 min	28,1
4	pluie intermittente	2,0 mm.h ⁻¹	3 épisodes de 20 min	11,4
5	pluie intermittente	2,0 mm.h ⁻¹	4 épisodes de 20 min	16,1
6	pluie intermittente	3,5 mm.h ⁻¹	3 épisodes de 15 min	27,5

Tableau 3.2 – Récapitulatif des différents scénarios de précipitation pour la première campagne d'essais.

Remarques techniques

Faisant suite aux résultats expérimentaux, quelques problèmes techniques sont à énoncer :

- les capteurs résistifs SEN0114 se détériorent au contact de l'eau avec l'altération de ses broches, voir la figure 3.19. Dès le deuxième essai, les mesures étaient incohérentes et elles n'ont pas été prises en compte dans l'analyse des résultats ;
- l'acquisition des mesures des capteurs SM100 sont de type "one shoot", c'est-à-dire que l'alimentation de ces capteurs est nécessaire seulement au moment de la mesure. Dans le cas où le capteur est alimenté sur une durée supérieure à 5 s, le capteur est taré. Cette information n'est pas écrite explicitement sur le manuel d'utilisation : à chaque allumage du dispositif, chaque capteur SM100 tare sa valeur. Durant cette campagne d'essais, le dispositif a été éteint entre chaque essai. Par conséquent, malgré la prise en compte du tarage des valeurs dans le post traitement, la continuité des mesures n'est pas assurée augmentant ainsi l'incertitude des mesures de l'ordre de 10 %.



Figure 3.19 – Phénomène de corrosion du capteur SEN0114.

Résultats expérimentaux

Les différents scénarios de précipitation sont détaillés dans le tableau 3.2. Ils sont aussi présentés sous la forme d'une représentation graphique de la teneur en eau en fonction du temps dans l'Annexe B, page 153. La variation de la teneur en eau du sol peut être modélisée par un profil similaire jusqu'à une profondeur de 67 cm (équivalent au niveau 4). Au-delà, la teneur en eau est très peu sensible aux événements pluvieux. Ce profil de forme trapézoïdale peut être caractérisé par sept valeurs dépendant du temps et de la teneur en eau du sol. Les valeurs caractérisées sont illustrées sur la figure 3.20. Elles représentent :

- l'état initial du sol avec sa teneur en eau $\omega_{initiale}$;
- l'apparition de l'événement pluvieux avec sa durée d'apparition $t_{initiale}$;
- l'état stationnaire du régime pluvieux avec sa durée de début t_{max1} , sa durée de fin t_{max2} et sa teneur en eau maximale ω_{max} ;
- le retour en régime permanent avec sa durée t_{finale} et sa teneur en eau ω_{finale} .

La méthode pour les déterminer est explicitée dans l'Annexe C, page 161.

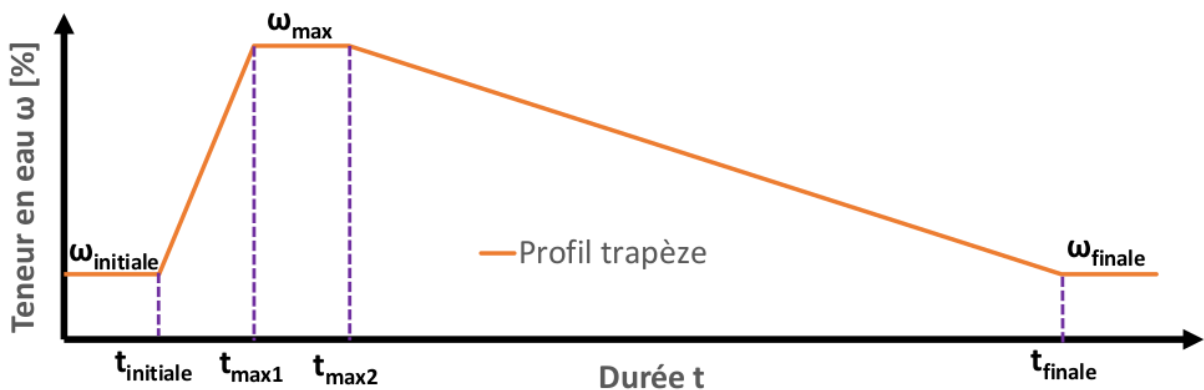


Figure 3.20 – Modélisation et caractérisation du profil trapézoïdal de teneur en eau en fonction du temps.

La figure 3.21 modélise la teneur en eau du sol pour chaque essai. Cette modélisation permet de visualiser l'écoulement de l'eau en fonction de la profondeur et des conditions de précipitation. La modélisation trapézoïdale se déplace vers la droite et traduit le phénomène d'écoulement de l'eau dans le sol. La durée de la teneur en eau maximale diminue avec la profondeur et implique que la durée de l'impact de la pluie diminue avec l'augmentation de la profondeur. Par la suite, les paramètres caractéristiques des profils sont analysés séparément afin d'améliorer l'interprétation des résultats expérimentaux.

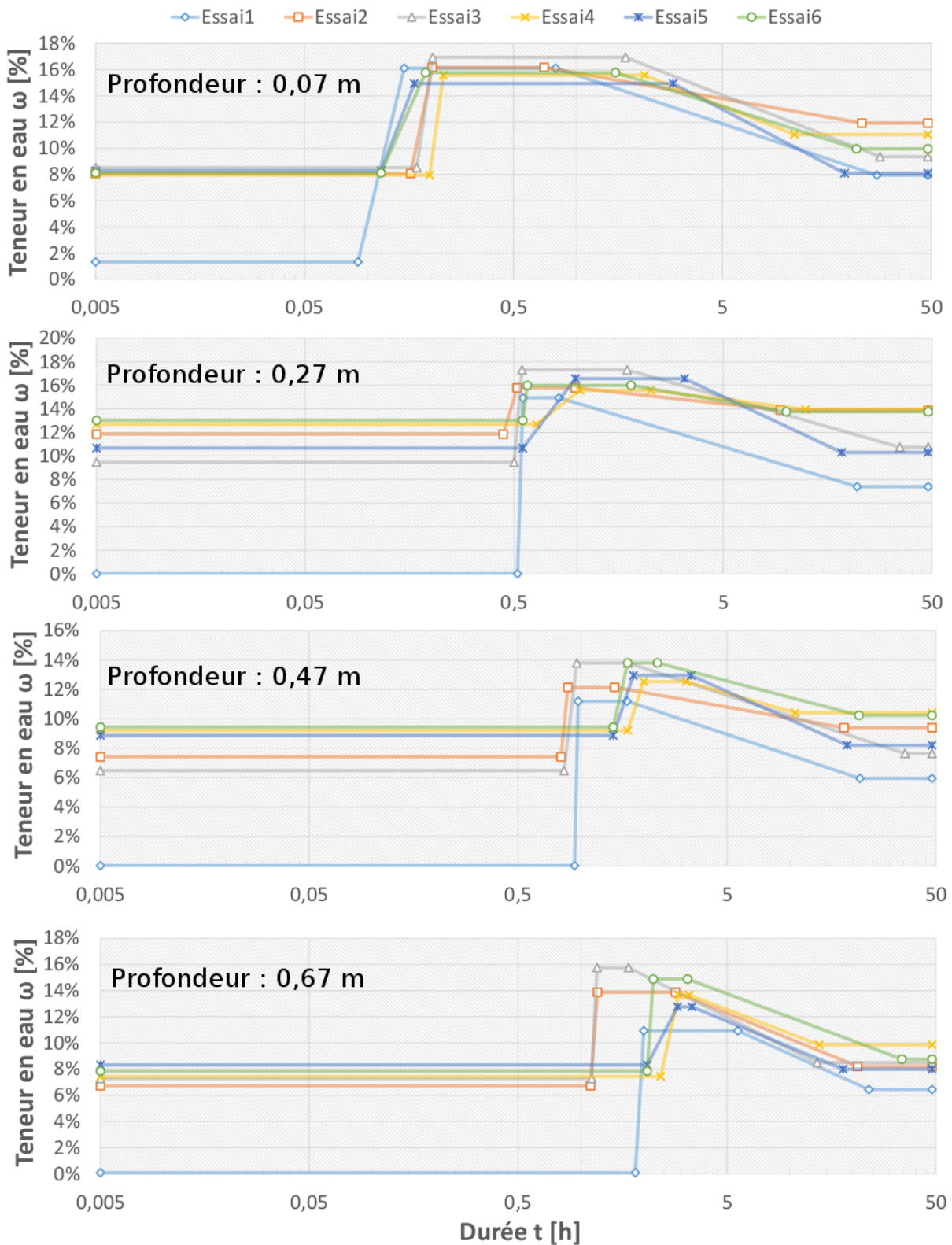


Figure 3.21 – Modélisation du profil de teneur en eau en fonction du temps pour la première campagne d'essais.

Les grandeurs $t_{initiale}$ et t_{max1} sont étudiées à partir de la figure 3.22 avec une représentation de la teneur en eau en fonction de la profondeur avec une interpolation par spline cubique. Deux groupes de points se distinguent : les essais 2/3/6 et les essais 4/5. Les essais 2/3/6 simulent une intensité de précipitation de $2,0 \text{ mm.h}^{-1}$. Cette dernière est identique pour les essais 4/5 mais le volume de pluie est moins important en raison de l'intermittence de la pluie. En définitive, plus l'intensité pluvieuse est importante plus petite sera la valeur de $t_{initiale}$ et de t_{max1} . Nous remarquons que l'intensité pluvieuse influence la vitesse d'écoulement de l'eau dans le sol.

Les résultats des grandeurs t_{max2} et t_{finale} ne sont pas commentés car ils ne présentent pas d'intérêt scientifique.

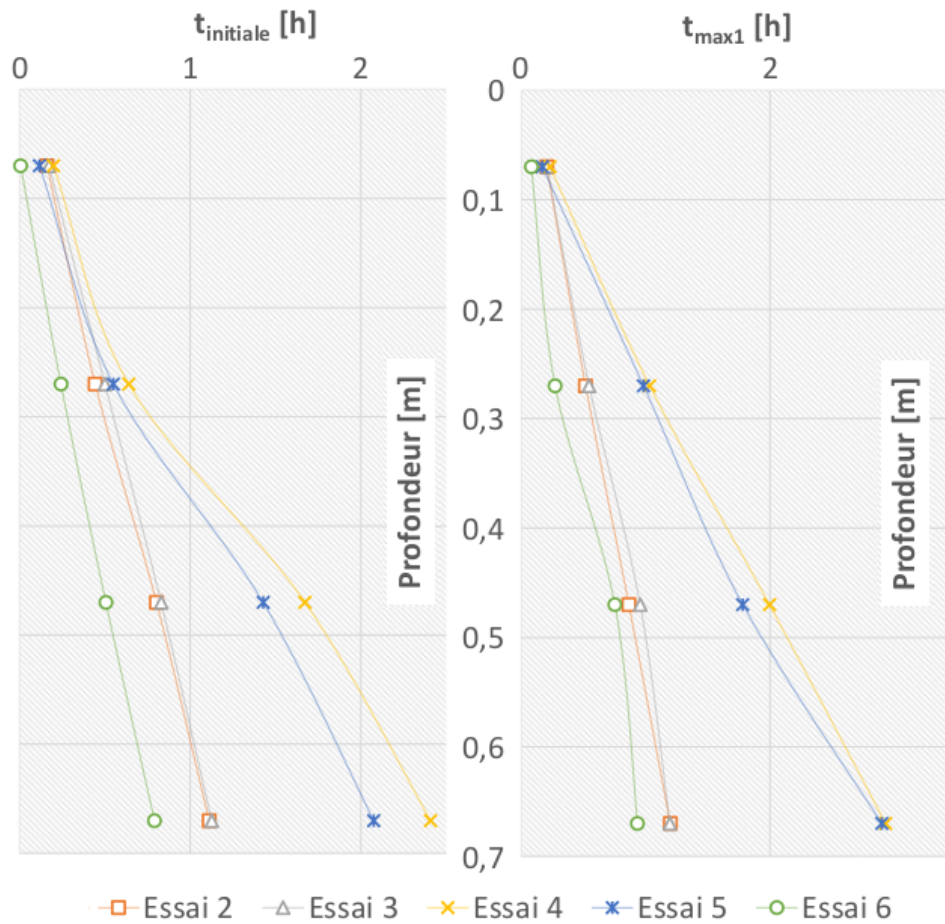


Figure 3.22 – Représentation graphique de la durée d'apparition de l'événement pluvieux $t_{initiale}$, de la durée de début t_{max1} et de fin t_{max2} de l'état stationnaire du régime pluvieux en fonction de la profondeur.

À propos des teneurs en eau $\omega_{initiale}$, ω_{max} et ω_{finale} , elles semblent avoir le même comportement. Cependant, en raison du problème technique de tarage pour les capteurs d'humidité SM100 pour cette campagne d'essais, aucune remarque fiable ne peut être décrite selon les différents scénarios de précipitation.

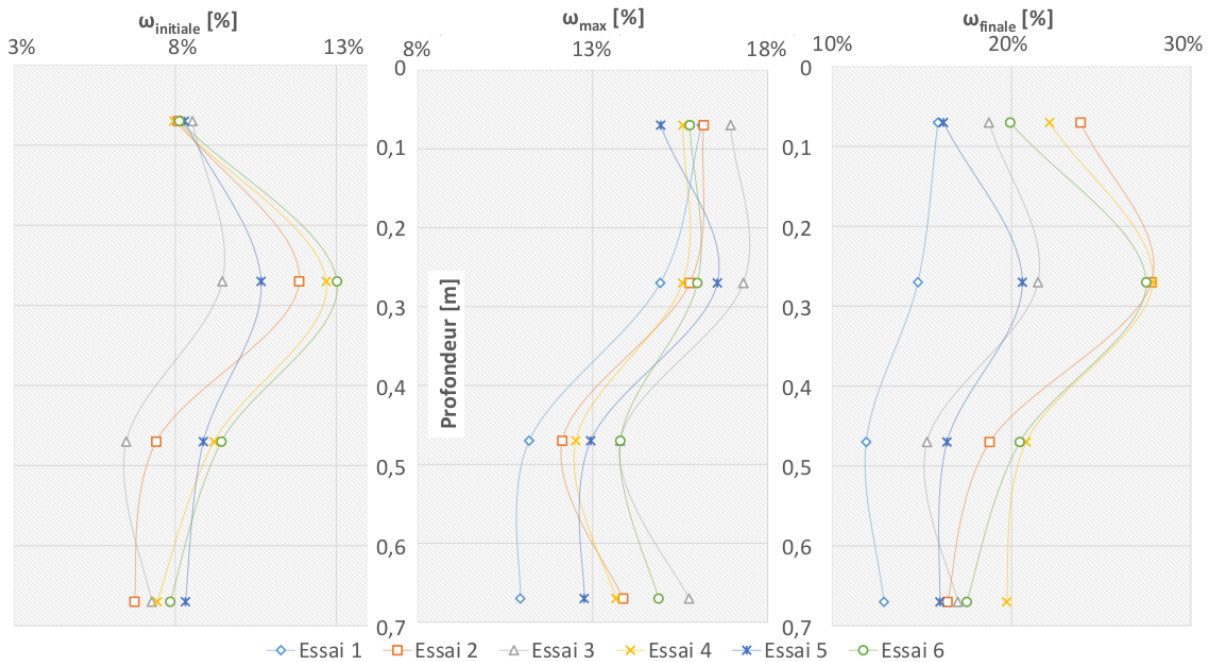


Figure 3.23 – Représentation graphique de la teneur en eau $\omega_{initiale}$ à l'état initial, la teneur en eau ω_{max} de l'état stationnaire du régime pluvieux et de la teneur en eau ω_{finale} au retour en régime permanent en fonction de la profondeur.

Événements pluvieux intermittents

L'objectif des essais 4/5/6 est d'étudier le phénomène d'amortissement d'un événement pluvieux en fonction de la profondeur. L'essai 6 illustre ce phénomène, voir la figure 3.24. Dans cet essai, trois précipitations à plusieurs intervalles réguliers sont appliquées à la surface du sol. L'intermittence de la pluie est visible mais ne varie que très peu jusqu'à une profondeur de 470 mm. Au-delà de cette profondeur, les cycles de pluie sont totalement amortis. À une profondeur de 1070 mm l'événement pluvieux dans sa totalité est amorti. L'intermittence de la pluie ne joue pas un rôle significatif sur le profil vertical de la teneur en eau d'un sol.

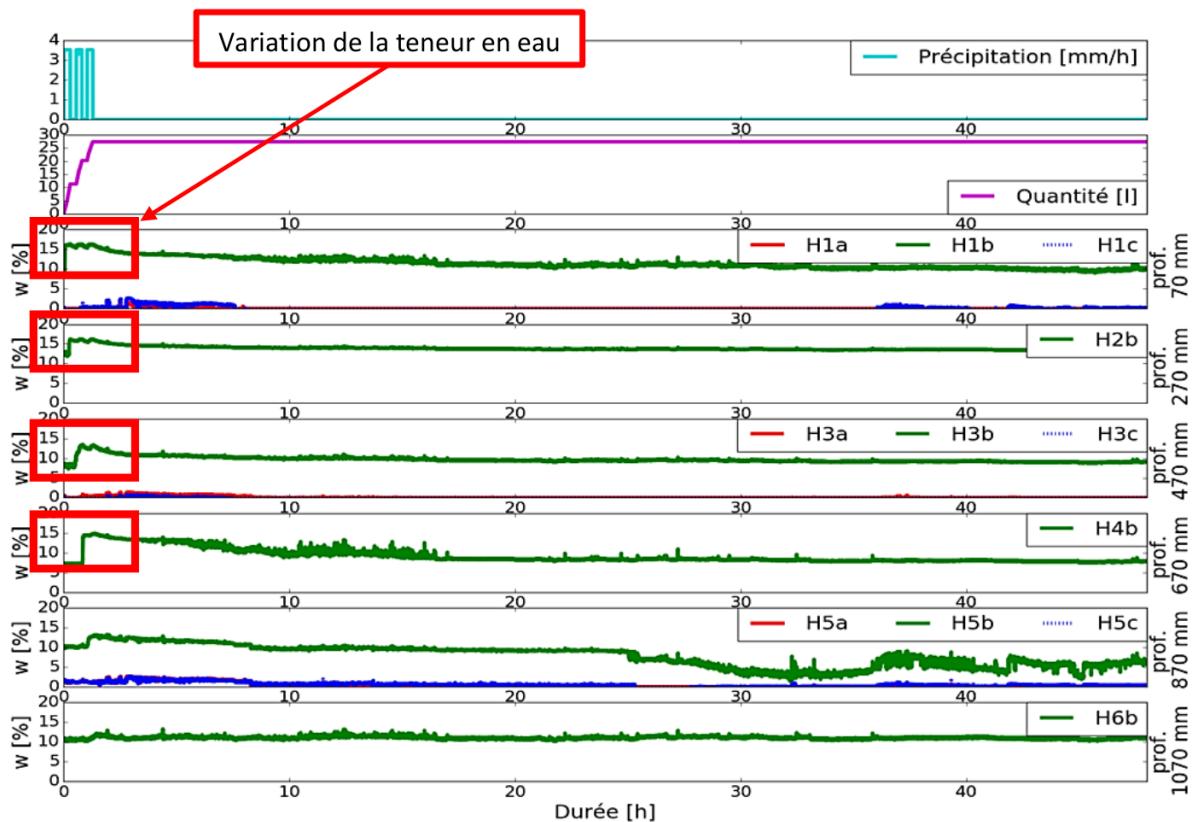


Figure 3.24 – Illustration du comportement hydraulique d'un sol soumis à une pluie intermittente.

Résumé de la campagne d'essais

Les différents essais réalisés ont montré une variabilité de la teneur en eau du sol soumis à différentes conditions de précipitation. Deux remarques importantes sont à souligner : *l'intensité pluvieuse* influence la *vitesse d'écoulement* de l'eau dans le sol et *les événements pluvieux sont amortis par le sol*. Cette première campagne d'essais a mis en évidence deux paramètres impactant la teneur en eau dans le sol : les conditions pluviométriques et la profondeur.

À partir de ces premiers résultats, des nouvelles conditions pluviométriques sont définies pour la prochaine campagne d'essais concernant un sol multicouche représentatif des conditions in-situ.

3.4.2 Campagne d'essais avec un sol multicouche

La deuxième campagne d'essais a pour objectif de reproduire le comportement hydrique du sol présent sur la coupe n°1 de l'échangeur air-sol expérimental de la plateforme géothermique, voir la partie 1.3.3. La composition de ce sol est répartie en quatre couches successives compartimentées par (de haut en bas) : de la *terre végétale*, du *remblai*, du *sablon* et un deuxième remblai (nommé "*gravier fond*") composé majoritairement de gravier.

Composition du sol in-situ

Lors de la mise en place de l'échangeur air-sol expérimental sur la plateforme géothermique, des échantillons des différents sols présents sur place ont été stockés. La quantité de sols stockés de sablon, de remblai et de gravier du fond n'étant pas suffisante pour remplir le dispositif expérimental, le sol manquant est reconstitué à partir de leur granulométrie, voir la figure 3.25. L'Annexe D (page 163) explique la méthodologie pour reconstituer chaque sol.

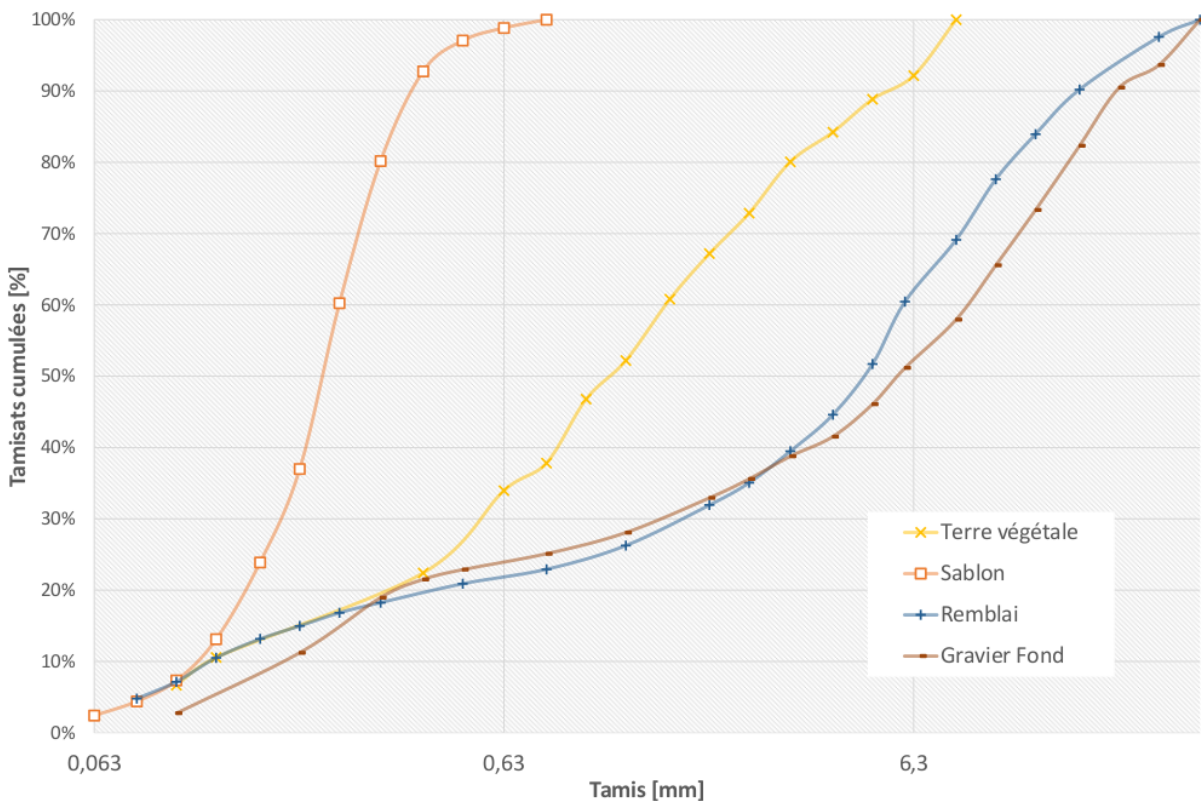


Figure 3.25 – Granulométrie des différents sols in-situ : terre végétal, remblai, sablon et gravier.

Mise en place du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est instrumenté par des capteurs capacitifs (SM100 et SEN0193) mesurant l'humidité du sol. La figure 3.26 récapitule le positionnement des capteurs et des différentes couches de sol.

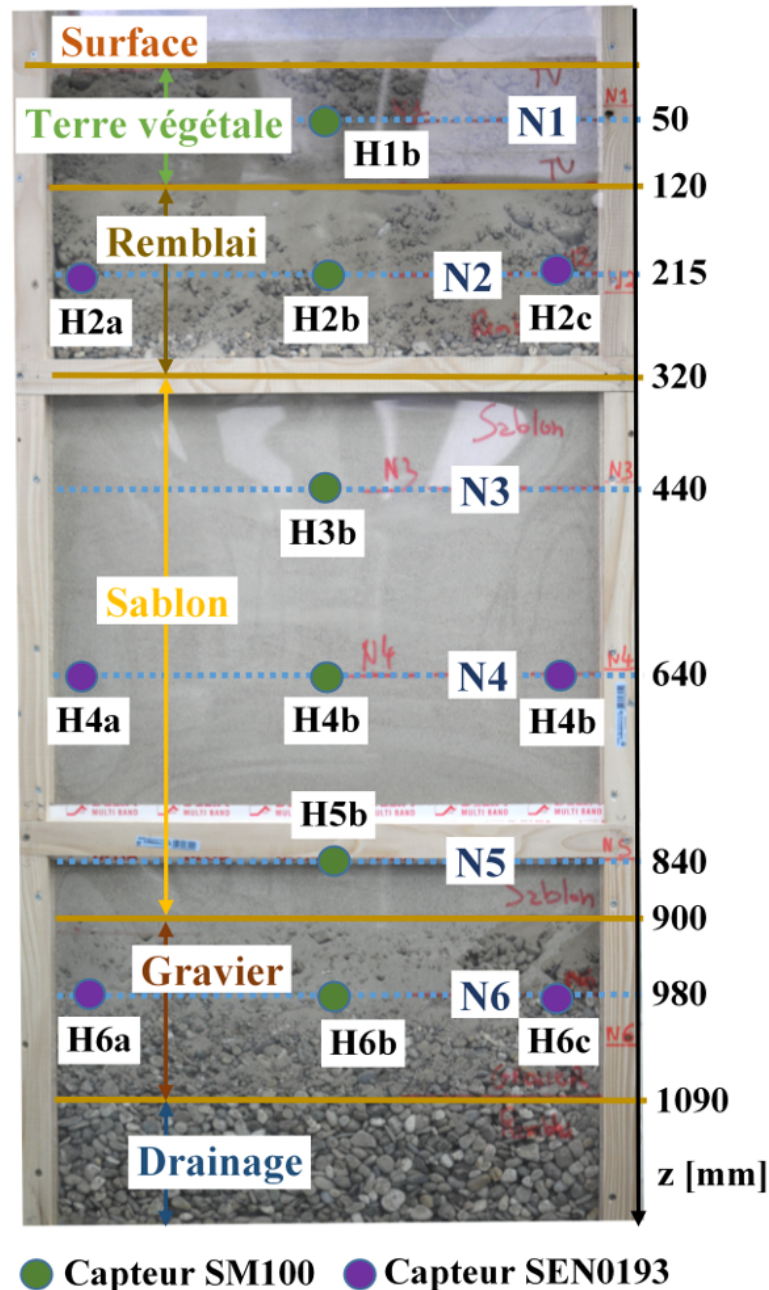


Figure 3.26 – Photo du dispositif expérimental avec un sol multicouche composé par (de haut en bas) : de la terre végétale, du remblai, du sablon, du gravier fond. La position des capteurs d'humidité du sol est annotée.

Conditions de précipitation

La seconde campagne compte sept essais, voir le tableau 3.3. Le premier essai consiste à humidifier le sol qui est à l'état sec afin d'assurer un état initial identique pour chaque essai. L'objectif des essais suivants est d'étudier le profil vertical de teneur en eau sous l'influence des conditions pluviométriques. Les essais 2/3/4 ont une consigne en intensité de $2,5 \text{ mm.h}^{-1}$ pour trois durées différentes. Les essais 5/6/7 ont une intensité deux fois plus élevée mais avec une durée équivalente au volume d'eau écoulé des essais respectifs 2, 3 et 4. Les conditions telles que définies facilitent l'interprétation des résultats avec l'étude d'un seul paramètre à la fois.

Essai n°	type de pluie	intensité moyenne	durée	volume de pluie [l]
1	humidification du sol	$2,5 \text{ mm.h}^{-1}$	3 h	50,2
2	pluie faible	$2,5 \text{ mm.h}^{-1}$	1 h 10 min	25,2
3	pluie faible	$2,5 \text{ mm.h}^{-1}$	2 h 05 min	45,4
4	pluie faible	$2,5 \text{ mm.h}^{-1}$	2 h 50 min	63,8
5	pluie modérée	$5,0 \text{ mm.h}^{-1}$	35 min	26,2
6	pluie modérée	$5,0 \text{ mm.h}^{-1}$	1 h 10 min	45,6
7	pluie modérée	$5,0 \text{ mm.h}^{-1}$	1 h 35 min	64,1

Tableau 3.3 – Récapitulatif des différents scénarios de précipitation de la seconde campagne d'essais.

Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux de chaque essai sont détaillés dans l'Annexe C, page 161. Pour simplifier l'interprétation des résultats, ceux-ci sont modélisés par le profil trapézoïdal de la même manière que la première campagne, voir l'Annexe D page 163. Cette modélisation est possible jusqu'à une profondeur de 84 cm (niveau 5), au-delà de cette profondeur la teneur en eau ne varie plus. Cette modélisation est illustrée par la figure 3.27 pour chaque profondeur mesurée et pour chaque essai. Cette première approche permet de visualiser le comportement hydrique de l'écoulement de l'eau dans le sol. Celui-ci est visible car le profil trapézoïdal se déplace vers la droite avec l'augmentation de la profondeur.

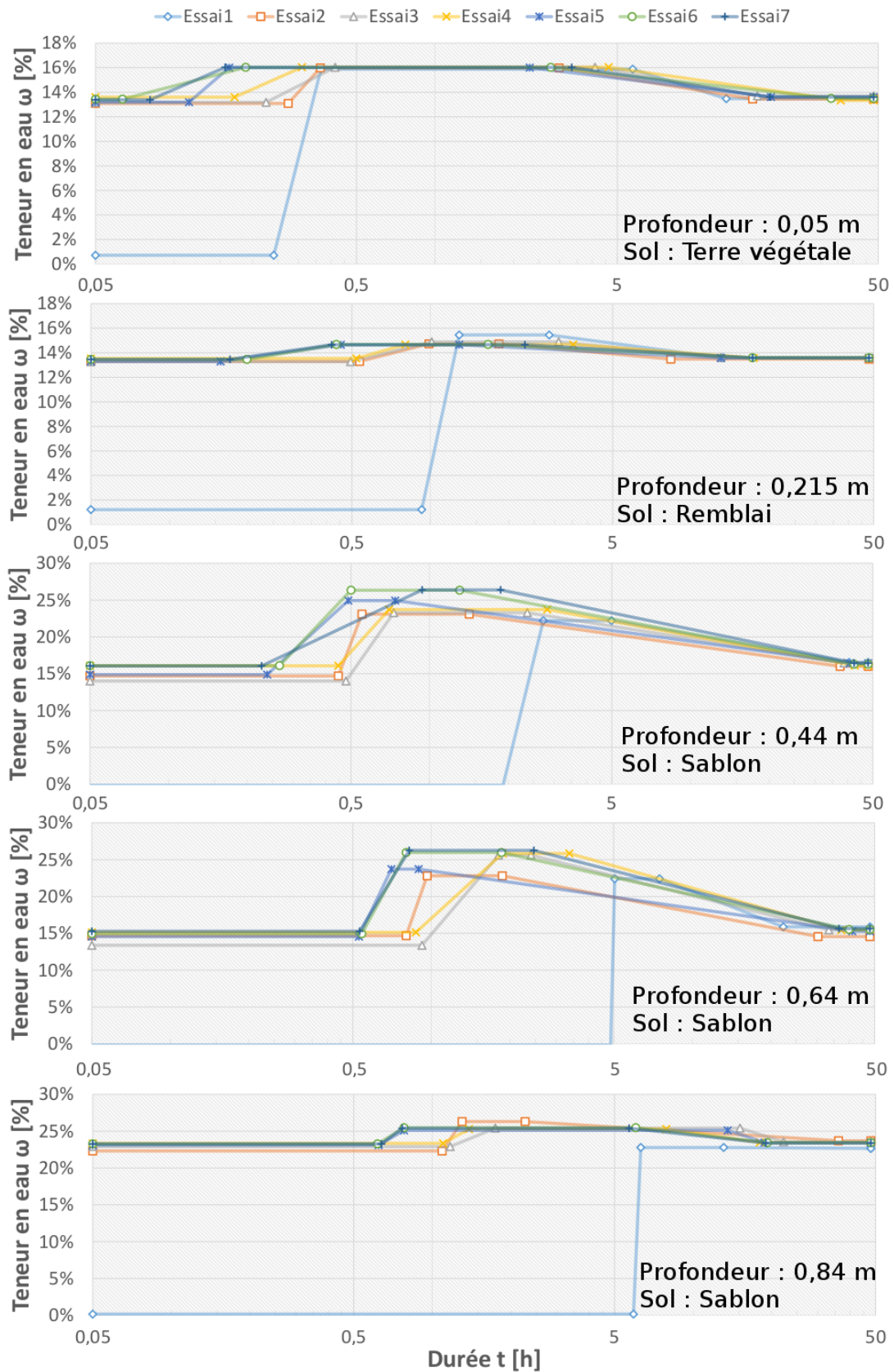


Figure 3.27 – Modélisation et caractérisation du profil trapézoïdal de teneur en eau en fonction du temps pour la deuxième campagne d’essais.

Les paramètres de la durée d'apparition de l'événement pluvieux $t_{initiale}$ et de la durée de début t_{max1} de l'état stationnaire du régime pluvieux sont analysés avec une représentation de la teneur en eau en fonction de la profondeur par une interpolation par splines cubiques. Deux tendances se distinguent : les essais 5/6/7 et les essais 2/3/4. La différence entre ces essais est l'intensité pluvieuse qui est respectivement de $5,0 \text{ mm.h}^{-1}$ et $2,5 \text{ mm.h}^{-1}$. Une première conclusion concerne la vitesse de l'écoulement de l'eau sous l'influence de l'intensité pluvieuse : *plus l'intensité est importante, plus rapide sera l'écoulement de l'eau dans le sol.*

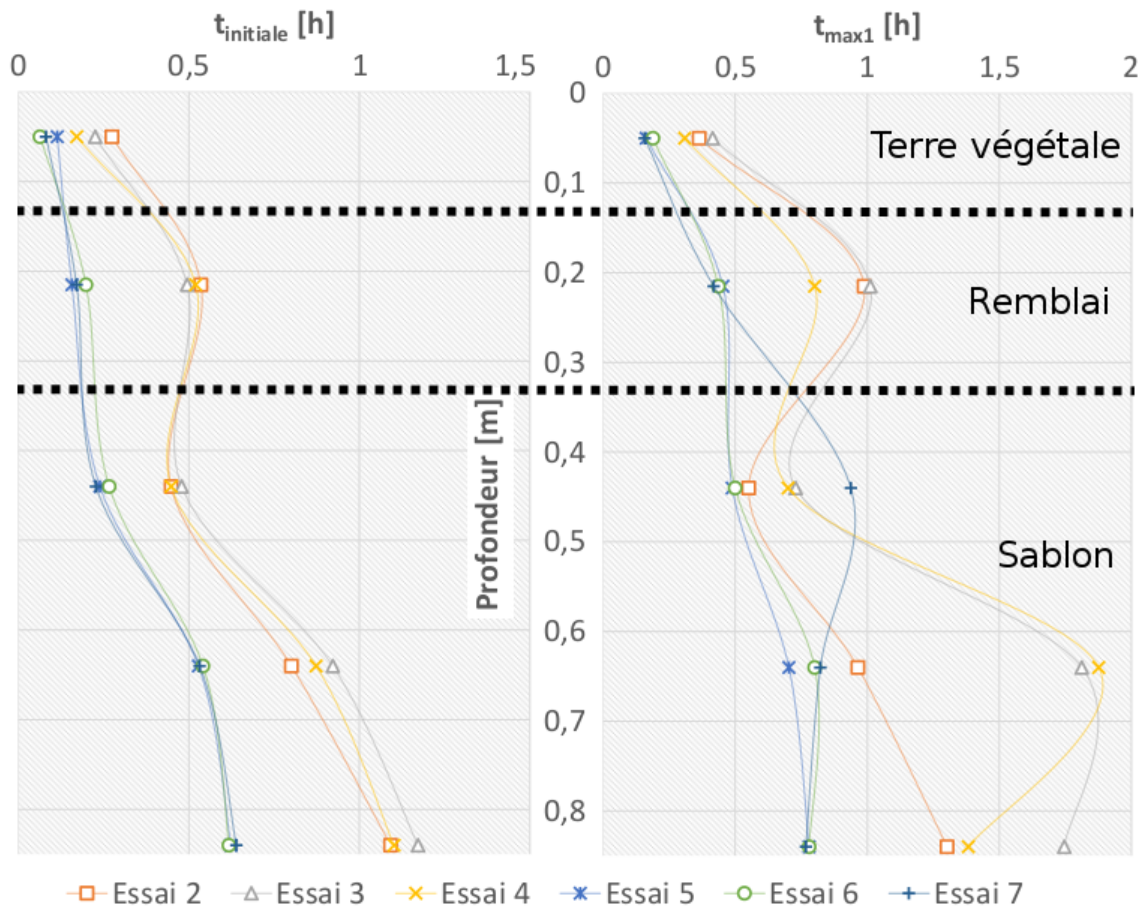


Figure 3.28 – Représentation graphique de la durée d'apparition de l'événement pluvieux $t_{initiale}$ et de la durée de début t_{max1} de l'état stationnaire du régime pluvieux en fonction de la profondeur.

Les paramètres de la durée de fin t_{max2} de l'état stationnaire du régime pluvieux et de la durée t_{finale} au retour en régime permanent sont étudiés. La tendance de t_{max2} est presque linéaire et celle de t_{finale} varie en fonction du type de sol. La durée des événements pluvieux classifiée par ordre croissant (essai 5/6/2/7/3/4 avec une durée de $35 \text{ min}/ 1 \text{ h } 10 \text{ min}/1 \text{ h } 10 \text{ min}/1 \text{ h } 35 \text{ min}/2 \text{ h } 05 \text{ min}/2 \text{ h } 50 \text{ min}$) correspond à l'ordre de classement des courbes t_{max2} sur les trois premiers niveaux de mesures. Nous remarquons que *la durée de précipitation et le type de sol influencent la durée de fin de l'état stationnaire du régime pluvieux.*

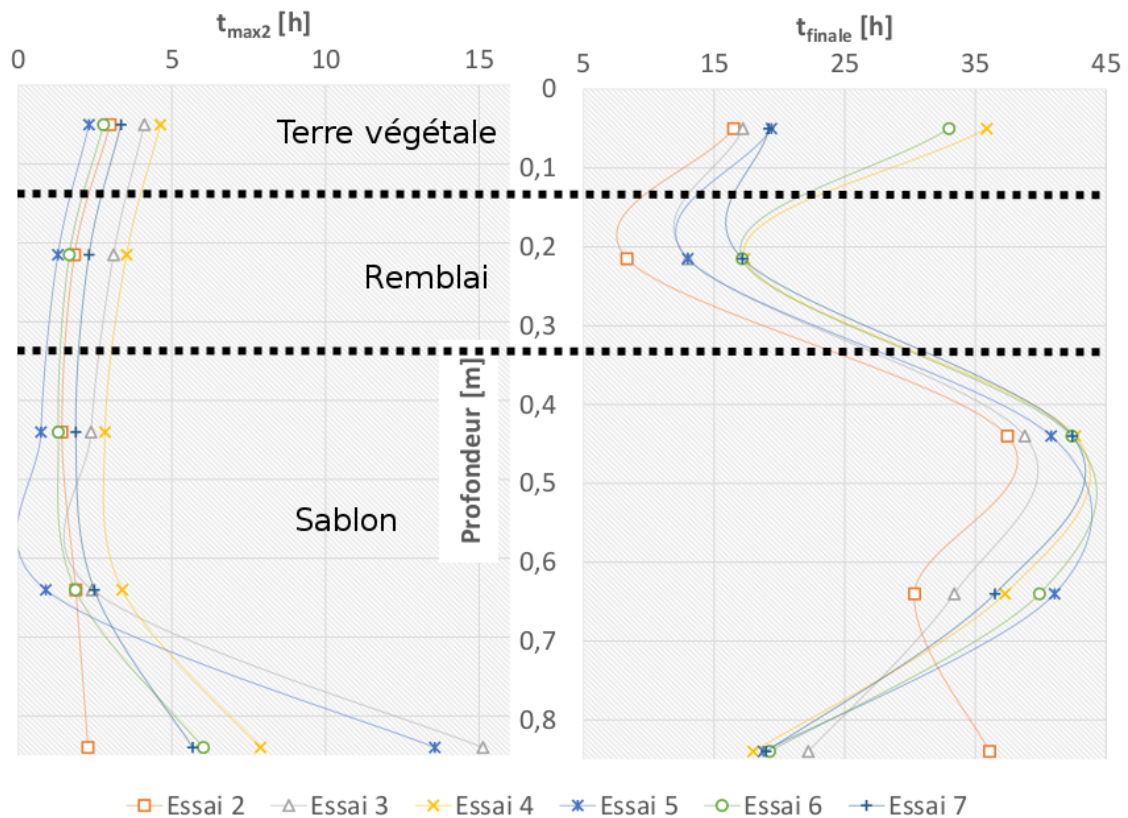


Figure 3.29 – Représentation graphique de la durée de fin t_{max2} de l'état stationnaire du régime pluvieux et la durée t_{finale} au retour en régime permanent en fonction de la profondeur.

Une analyse est effectuée sur la variation de la teneur en eau avec les paramètres $\omega_{initiale}$, ω_{max} et ω_{finale} .

À partir du paramètre ω_{max} , qui correspond à la teneur en eau à l'état de saturation du sol, la composition du sol est différentiable avec trois teneurs en eau distinctes : la terre végétale à 16 kg.kg^{-1} , le remblai à 15 kg.kg^{-1} et le sablon à 25 kg.kg^{-1} . Par conséquent, le type de sol influence l'humidification du sol.

L'hypothèse d'un régime permanent est accréditée par la similarité du profil vertical de la teneur en eau à l'état initial avec $\omega_{initiale}$ et à l'état final avec ω_{finale} . Le point important réside dans le profil vertical avec une nette augmentation à partir de 70 cm de profondeur en régime permanent. Cette variation suppose que l'eau est stockée en quantité plus importante par le sablon à 50 cm qu'à 80 cm. Il serait intéressant de connaître le facteur influant : la profondeur, le type de sol ou la configuration du sol. Les deux premiers facteurs sont éliminés car la teneur en eau dans le sablon est constante entre 32 cm et 64 cm et le sablon n'a pas une teneur en eau homogène en régime permanent. Par déduction, la configuration du sol est le facteur qui influence la teneur en eau. Cette hypothèse se justifie par la présence de remblai, un sol composé d'un mélange de gravier et d'argile, en dessous du sablon. De manière générale, nous remarquons que la teneur en eau d'un sol peut être influencée sur 10 cm d'épaisseur par la teneur en eau d'un autre type sol.

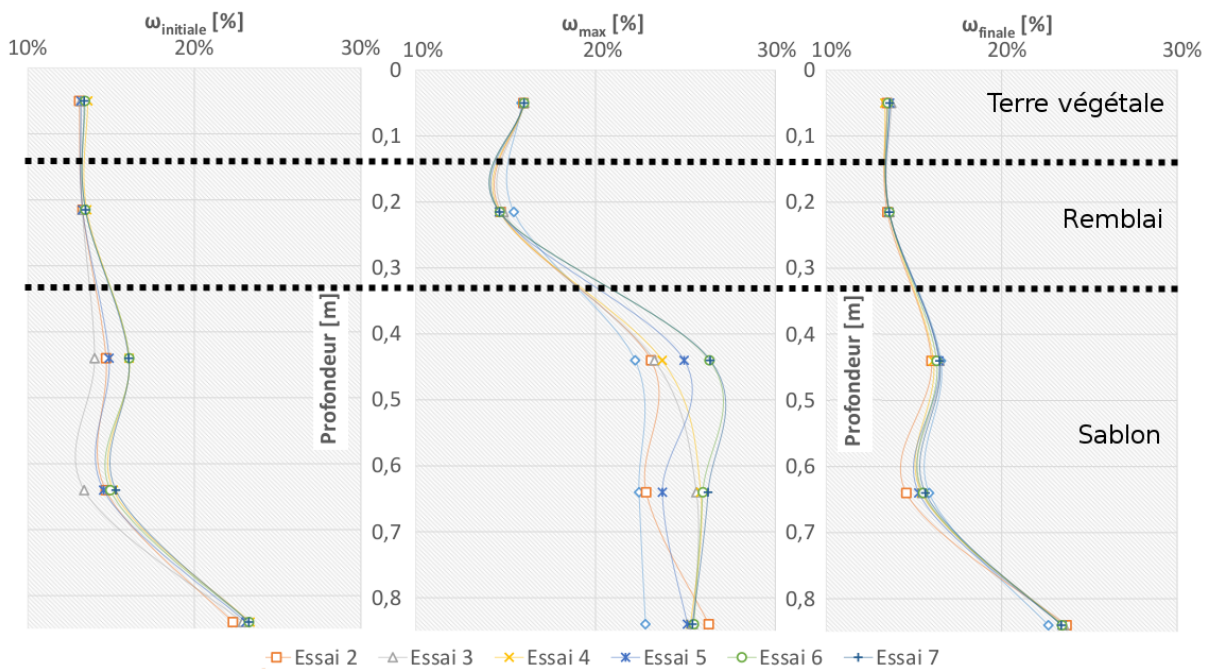


Figure 3.30 – Représentation graphique de la teneur en eau $\omega_{initiale}$ à l'état initial, la teneur en eau ω_{max} de l'état stationnaire en régime pluvieux et de la teneur en eau ω_{finale} en régime permanent en fonction de la profondeur.

Résumé de la campagne d'essais

Les essais effectués ont montré la variation de la teneur en eau du sol sous l'influence des *conditions des événements pluvieux, la profondeur, le type et la disposition du sol*. Cette deuxième campagne a mis en évidence plusieurs paramètres influant :

- l'intensité pluvieuse influence la vitesse de l'écoulement de l'eau dans le sol ;
- la profondeur (par rapport à la surface) et la durée de précipitation impactent la durée de l'état stationnaire en régime pluvieux ;
- le type de sol influence la teneur en eau et la durée ;
- la disposition des différentes couches de sol influence le profil vertical de teneur en eau en régime permanent.

3.5 Bilan du chapitre

Ce chapitre présente un dispositif expérimental pour l'étude du profil vertical de teneur en eau d'un sol sous l'influence de conditions pluviométriques. Ce dispositif est **conçu, élaboré, instrumenté et validé au sein de notre laboratoire**. Deux campagnes d'essais avec des pluies représentatives des conditions pluviométriques in-situ sont effectuées avec deux configurations de sol : un sol homogène constitué de sable 0 – 5 mm et un sol multicouche composé de terre végétale, remblai, sablon et d'un autre remblai. Les différents résultats expérimentaux permettent de modéliser un profil trapézoïdal de teneur en eau en fonction du temps. Ils mettent aussi en évidence les paramètres impactant la teneur en eau d'un sol :

- l'intensité pluvieuse influence la vitesse de l'écoulement de l'eau dans le sol ;
- la profondeur influence la variation de la teneur en eau d'un sol. Au-delà d'une certaine profondeur, l'humidité du sol ne varie quasiment plus ;
- la profondeur et la durée de précipitation influencent la durée de la teneur en eau maximale du sol ;
- le type et la disposition du sol influencent le profil vertical de teneur en eau en régime permanent.

Ces informations enrichissent la connaissance du comportement hydrique des sols présents sur la plateforme géothermique. Dans le chapitre suivant, l'impact du type, de l'état d'humidité et de la compacité d'un sol sur ses propriétés thermiques est étudié. À partir d'un modèle numérique d'un échangeur air-sol, une étude est menée dans le chapitre 5 pour analyser l'impact du type de sol (à long terme) et d'événements pluvieux (à court terme) sur ses performances énergétiques.

Étude des propriétés thermo-physiques du sol sous l'influence de l'état de saturation en eau et de la charge verticale

4.1 Contexte et objectifs

Dans le chapitre 2, des études [Ker49 ; Abu03] ont montré l'impact de la densité et de la teneur en eau d'un sol sur la diffusivité thermique d'un sol. Cette dernière [Sal06 ; TB93 ; Go15] a une influence significative sur les performances énergétiques d'un échangeur horizontal. La densité d'un sol et la teneur en eau varient en fonction des conditions géologiques (présence de nappe d'eau et poids du sol en amont). Dans ce contexte, ce chapitre a pour objectif d'étudier la variation de la **diffusivité thermique d'un sol poreux sous l'influence de l'état de saturation en eau de la charge verticale**. La difficulté de cette étude expérimentale réside dans la mesure de la diffusivité thermique d'un sol poreux contraint par une charge verticale.

D'une part, la charge verticale correspond à la pression exercée à une profondeur équivalente à l'enfouissement d'un système géothermique de surface ($< 50\text{ m}$ soit une contrainte verticale de l'ordre de 140 kPa). La charge verticale est appliquée par un système de bras de levier sur un œdomètre. Ce système est disponible au laboratoire et il permet facilement d'appliquer des contraintes verticales souhaitées. Ce dispositif est donc **retenu**.

D'autre part, il existe dans le commerce des dispositifs permettant de caractériser les propriétés thermo-physiques d'un sol. Ceux-ci sont composés d'un capteur thermique (de la forme d'une aiguille) qui doit être plantée dans l'échantillon à caractériser. Avec l'introduction de l'aiguille dans le sol compacté, la densité de l'échantillon risque de varier et de fausser les résultats de l'étude. C'est pourquoi une méthode pour caractériser la *diffusivité thermique d'un sol poreux* est recherchée par une étude bibliographique.

Depuis de nombreuses années, la caractérisation des propriétés thermo-physiques d'un matériau (conductivité thermique λ , capacité thermique volumique C , diffusivité thermique D ou effusivité thermique e , voir le chapitre II 2.1 Caractérisation thermo-physique d'un sol) a suscité de nombreux travaux de recherche dans la communauté scientifique avec

l'aboutissement à des méthodes de caractérisation thermique d'un matériau. De manière générale, ces méthodes sont réalisées en trois étapes. La première consiste à caractériser le comportement thermique de l'échantillon en développant un modèle. La deuxième est de mesurer la réponse de l'échantillon soumis à une excitation thermique. La troisième étape identifie les propriétés thermo-physiques de l'échantillon à partir du modèle. Un moyen de présenter et de classer ces méthodes est de distinguer le régime de l'excitation thermique : en *régime permanent*, en *régime transitoire* ou en *régime périodique*.

La méthode de la *plaque chaude gardée* et de la *mini-plaque chaude* sont des méthodes de mesures de la conductivité thermique basées sur une relation flux-température en *régime permanent*. Le principe, voir la figure 4.1, est de réaliser un transfert de chaleur unidirectionnel. Pour respecter cette condition, la géométrie de l'échantillon est de forme *plane* avec une *surface très grande par rapport à l'épaisseur*. Un élément chauffant impose un flux uniforme sur l'une de ses faces alors que l'autre est maintenue à une température constante, plus froide. La conductivité thermique est déduite par un modèle 1D avec les mesures du flux traversant l'échantillon et de la température sur ses deux faces. Cette méthode est normalisée (ISO 8302 :1991 et NF EN 1946-2) et offre de bons résultats pour les *matériaux isolants*.

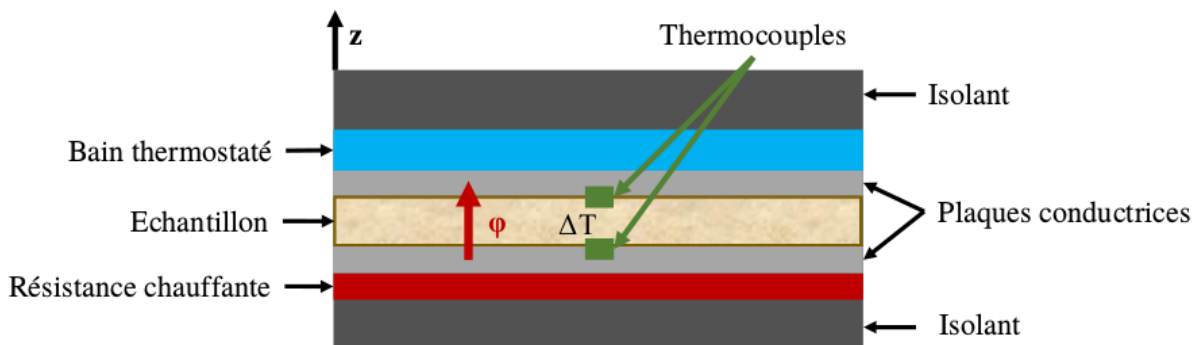


Figure 4.1 – Schéma de principe de la méthode de la *plaque chaude gardée*.

Les méthodes en *régime transitoire* sont nombreuses, voir figures 4.2 et 4.3 : *fil chaud*, *plan chaud*, *ruban chaud*, *hot disc*, *tricoche* et *flash*. Elles se distinguent par la forme de l'excitation thermique à appliquer sur la surface de l'échantillon (échelon, créneau ou impulsion) et par la géométrie de la résistance chauffante (cylindrique, rectangulaire ou circulaire). À partir de ces paramètres, un modèle 1D ou 2D est développé pour caractériser : la conductivité thermique (méthodes du *fil chaud*, du *ruban chaud*, du *hot disc* et du *tricoche*), l'effusivité thermique (méthode du *plan chaud*) ou la diffusivité thermique (méthode *flash*). L'hypothèse commune du milieu semi-infini impose des *tailles importantes des échantillons* pour négliger les pertes latérales.

La méthode en *régime périodique* voir figure 4.4, est utilisée pour la première fois en 1863 par Angström [Ång63]. Un échantillon est soumis à une excitation périodique et la réponse thermique est mesurée en deux points. La diffusivité thermique est déduite à

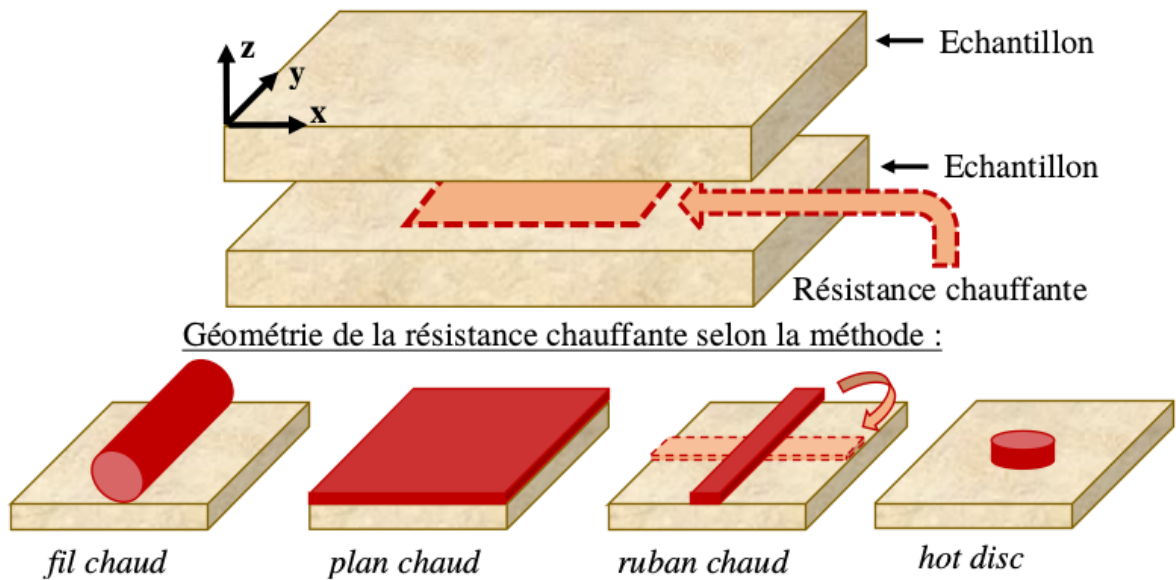
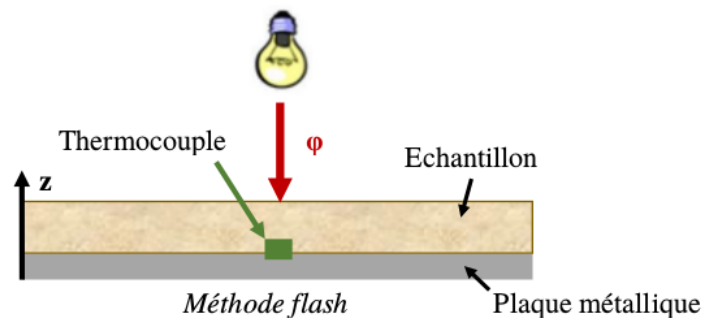


Figure 4.2 – Schéma de principe des méthodes en régime transitoire.

Figure 4.3 – Schéma de principe de la méthode *flash*.

partir du déphasage entre les deux températures. En 1961, Cowan [Cow61] propose une extension de la méthode d'Angström en utilisant comme source d'excitation un canon à électrons. Avec le développement technologique des sources d'énergie, des moyens de détections et du traitement de signal, les méthodes photo-thermiques ont connu un essor important. Des approches numériques sont aussi proposées pour identifier les propriétés thermo-physiques comme la recherche du coefficient d'inversion du problème en utilisant les réseaux de neurones [Chu12].

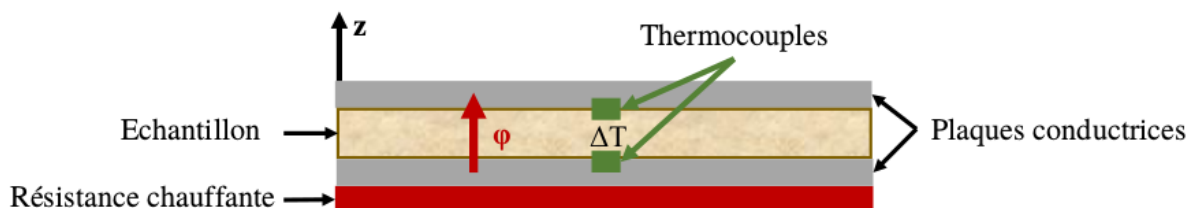


Figure 4.4 – Schéma de principe de la méthode en régime périodique.

Méthode	Régime	Grandeurs mesurées	Signal d'excitation	Limite	Références
Plaque chaude gardée	Permanent	λ	Continu	Taille importante	[Mar68 ; Ban73 ; Pon88]
Mini-plaque chaude	Permanent	λ	Continu	Taille importante	[BD94]
Fil chaud	Transitoire	λ	Échelon	Taille importante	[NN81 ; ZDM93]
Plan chaud	Transitoire	e, c, ρ et λ	Impulsion	Taille importante	[ZD93 ; JAK06]
Ruban chaud	Transitoire	λ	Échelon	Taille importante	[Ham03 ; JM04]
Hot disc	Transitoire	λ	Échelon	Perturbation du câble d'alimentation	[Gus91 ; He05]
Tricouche	Transitoire	λ	Créneau	Taille importante	[JDP09]
Flash	Transitoire	D	Impulsion	Non compatible avec les milieux poreux	[Par61 ; Deg86]
Régime périodique	Périodique établi	λ, D	Sinusoidale	Attente du régime périodique	[Bou04]

Tableau 4.1 – Récapitulatif des méthodes pour caractériser les propriétés thermo-physiques des matériaux.

Une comparaison de ces différentes méthodes de caractérisation des propriétés thermophysiques des matériaux est résumée dans le tableau 4.1. La caractérisation de la *diffusivité thermique* d'un matériau est possible avec la méthode du *plan chaud*, la méthode *flash* et la méthode en régime *périodique*. Le *plan chaud* nécessite un échantillon avec une surface très grande pour une *faible épaisseur*. En raison de l'hétérogénéité des grains d'un sol par exemple du remblai, l'épaisseur de l'échantillon est **conséquence** pour obtenir une caractérisation **représentative**. La méthode *flash* **n'est pas compatible** avec les milieux poreux, car l'absorption surfacique imposée par la source thermique n'est pas totale. La méthode possible pour caractériser un **sol poreux** est la méthode en **régime périodique**.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier la *diffusivité thermique d'un sol poreux sous l'influence de l'état de saturation en eau, du type de sol et de la contrainte verticale* avec la mise au point d'une méthode en *régime périodique* pour identifier la *diffusivité thermique d'un sol poreux* au sein d'un *œdomètre*.

Le chapitre est organisé avec la réalisation des étapes suivantes :

1. la présentation du principe de la méthode en *régime périodique* ;
2. la mise en place du dispositif expérimental ;
3. l'*instrumentation* de ce dernier ;
4. le *développement* et la *validation* d'une méthode pour identifier la diffusivité thermique d'un sol poreux à l'état sec et saturé en eau ;
5. la réalisation d'une *campagne d'essais* avec deux types de sol soumis à différentes charges verticales.

Les résultats obtenus détermineront l'impact de l'état de saturation, du type de sol et de la compacité d'un sol poreux sur sa diffusivité thermique. L'augmentation de ces connaissances scientifiques permettra de mieux comprendre l'impact des conditions géologiques sur les performances énergétiques d'un échangeur air-sol.

4.2 La méthode en régime périodique

Le principe de la méthode en régime périodique est de mesurer la réponse thermique d'un milieu homogène pour lequel une onde thermique sinusoïdale est appliquée à l'une de ses faces comme l'illustre la figure 4.5. La forme de l'onde thermique imposée est définie par une fonction sinusoïdale (équation 4.1) dépendante du temps t et comprenant comme paramètres : une température moyenne T_{moy} [$^{\circ}C$], une amplitude de température T_{ampl} [$^{\circ}C$] et une fréquence d'oscillation ω [$rad.s^{-1}$].

$$T_{sol}(z = 0, t) = T_{moy} + T_{ampl} \cdot \cos(\omega \times t) \quad (4.1)$$

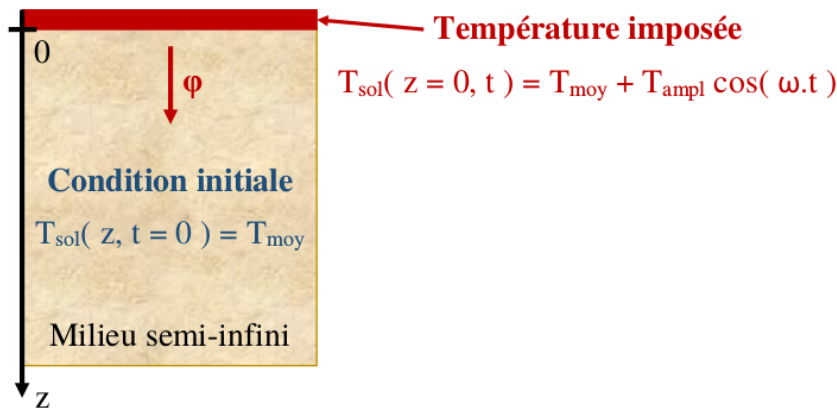


Figure 4.5 – Schéma du milieu semi-infini avec une température sinusoïdale imposée à sa surface.

Les transferts thermiques dans le milieu sont exclusivement de conduction. L'hypothèse du milieu semi-infini suppose une direction unidirectionnelle de la chaleur dans l'axe z . Par conséquent, la conduction thermique dans le milieu se décrit par l'équation de la chaleur dans la direction z (équation 4.2).

$$\frac{\partial^2 T_{sol}}{\partial z^2} = \frac{1}{D_{sol}} \frac{\partial T_{sol}}{\partial t} \quad (4.2)$$

En supposant une température uniforme T_i en condition initiale et une température constante T_i lorsque z tend vers ∞ , les conditions aux limites et initiales s'écrivent :

$$\begin{cases} T_{sol}(z = 0, t) = T_{moy} + T_{ampl} \cdot \cos(\omega \cdot t) \\ T_{sol}(z, t = 0) = T_{moy} \\ T_{sol}(z = \infty, t) = T_{moy} \end{cases} \quad (4.3)$$

Le problème étant de nature périodique et linéaire (les propriétés thermo-physiques du sol sont supposées constantes au cours du temps), une solution en régime périodique est obtenue en utilisant la méthode de séparation des variables du temps t et de l'espace z . Ainsi, la température dans le sol est connue et se décrit par l'équation 4.4

$$T_{sol}(z, t) = T_{moy} + T_{ampl} \times e^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot D_{sol}}}} \cdot \cos(\omega \times t - z\sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot D_{sol}}}) \quad (4.4)$$

Cette formule décrit l'évolution de la température du sol en tout point et à tout instant avec un amortissement exponentiellement et un déphasage dépendant de la diffusivité thermique du sol D , de la fréquence imposée par l'onde thermique ω et de la profondeur z . Elle implique deux constats :

- l'amplitude des oscillations de la température dans le sol décroît rapidement avec l'augmentation de la profondeur et de la fréquence d'oscillation ;
- l'**estimation** de la *diffusivité thermique* à partir d'une fréquence d'oscillation connue et de la mesure de la température du sol à deux points distants.

La méthode en régime périodique permet d'identifier la diffusivité thermique d'un échantillon de sol et cette méthode est appliquée à notre dispositif expérimental afin d'identifier la diffusivité thermique d'un sol poreux.

4.3 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental répond à deux problématiques : l'identification de la diffusivité thermique et l'application d'une charge verticale à la surface du sol poreux. Ce dernier est assuré par l'appareil de laboratoire suivant : l'œdomètre. Afin de respecter la méthode en régime périodique, celui-ci est adapté avec l'ajout d'une source de chaleur et le remplacement du tube métallique par un tube en PMMA.

Le dispositif expérimental se schématise par la figure 4.6 et se compose de 5 éléments :

- le *piston* qui transmet la contrainte à appliquer sur le sol poreux ;
- le *sol* qui équivaut à l'échantillon dont la diffusivité thermique est à identifier ;
- le *tube* qui confine le sol poreux ;
- la *source de chaleur* qui contrôle la température à imposer à la surface du sol poreux ;
- le *socle* qui supporte les autres éléments du dispositif.

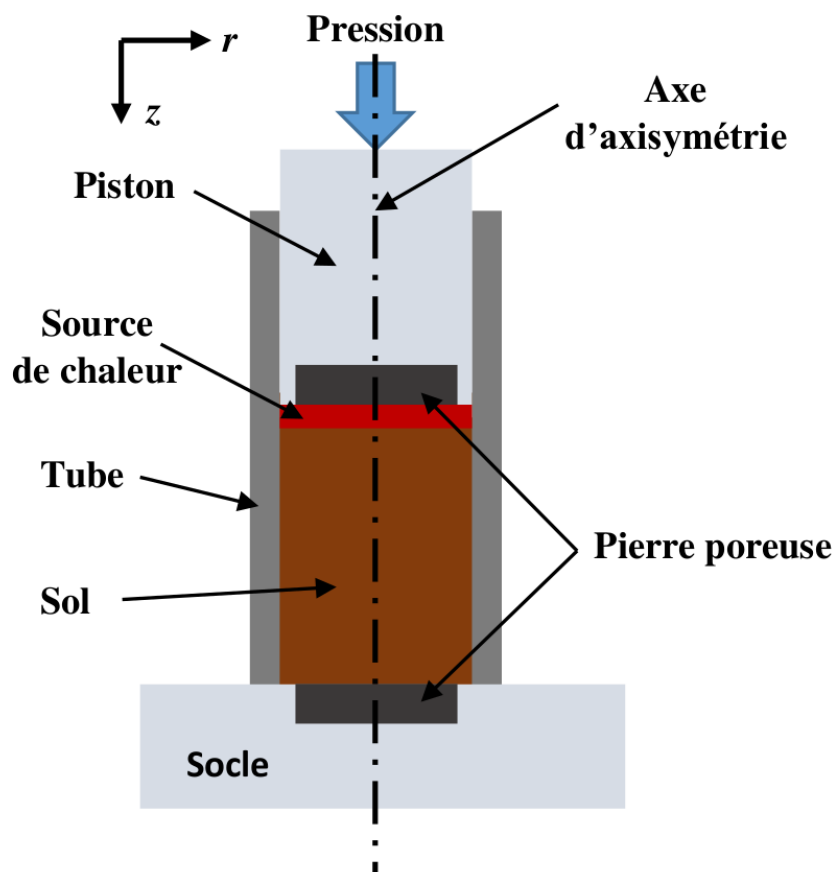


Figure 4.6 – Schéma de principe du dispositif expérimental.

Pour appliquer la méthode en *régime périodique* au dispositif expérimental, il est nécessaire d'*instrumenter* ce dernier par des thermocouples mesurant la **température** à des emplacements connus et de définir les caractéristiques en **fréquence** et en **amplitude** de l'onde thermique d'excitation à appliquer à la surface de l'échantillon.

4.4 Instrumentation du dispositif expérimental

La charge verticale appliquée sur un échantillon de sol est effectuée par un *œdomètre*, voir figure 4.7. Cet appareil de laboratoire est utilisé en géotechnique pour mesurer le tassement d'un échantillon de sol soumis à une charge verticale. Les essais œdométriques simulent le tassement avec des conditions de drainage des sols en plaçant un échantillon de sol dans un cylindre. Ce dernier possède une paroi extrêmement rigide afin de négliger les déformations latérales. Cependant, la paroi métallique est remplacée par un tube en Polyméthacrylate de méthyle (PMMA) pour nos essais car le PMMA a une meilleure isolation thermique que le métal. Le rapport hauteur-diamètre est d'au plus 1 pour 3 afin de reproduire une compression purement verticale. La contrainte verticale est appliquée sur le piston par des masses en utilisant le principe du bras de levier.

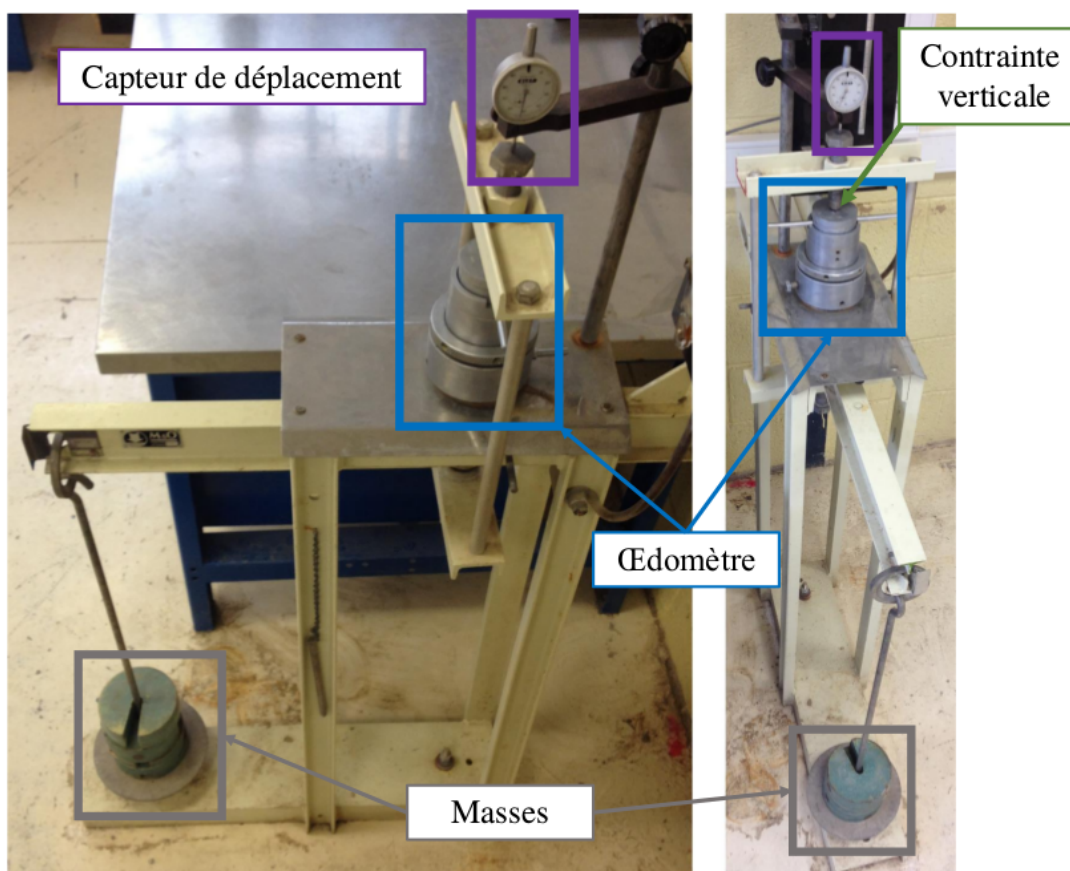


Figure 4.7 – Photo d'un œdomètre et présentation de son principe de fonctionnement : contrainte verticale appliquée sur le piston par des masses.

Mesures de la température du sol

La réponse thermique est mesurée par sept thermocouples de type K (incertitude de $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$), voir la figure 4.8. Les thermocouples sont placés à intervalle régulier de 10 mm dans le sol avec une précision de $\pm 1\text{ mm}$. Afin de pouvoir identifier la diffusivité thermique représentative d'un échantillon avec des *tailles de grains de l'ordre du centimètre* qui est le cas pour un sol de remblai, la température est mesurée sur une profondeur minimale de 40 mm (position de T_4). Deux thermocouples T_5 et T_6 sont ajoutés dans le cas où les grains sont de plus grosses tailles. La température de l'air est aussi mesurée pour calculer le flux de chaleur échangé entre l'œdomètre et son environnement.

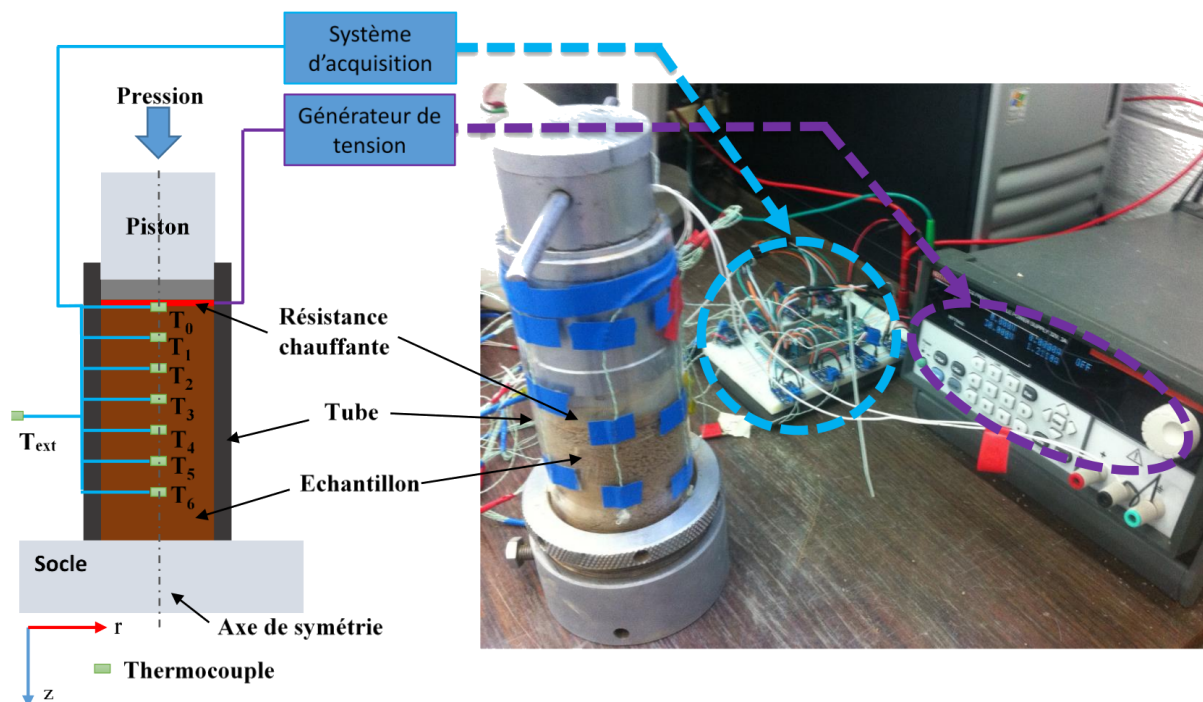


Figure 4.8 – Présentation de l'œdomètre instrumenté. À gauche : vue en coupe avec l'emplacement des thermocouples. À droite : photo de l'œdomètre avec le système d'acquisition et le générateur de tension.

Chaque thermocouple est étalonné dans un bain d'eau tempérée entre $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (plage de température du sol après excitation thermique). L'étalonnage est illustré par la figure 4.9.

Caractéristiques du signal d'excitation

L'excitation thermique est émise par une résistance chauffante. Celle-ci est contrôlée par un générateur de tension qui lui-même est piloté par une application *LabVIEW®*. Cette dernière génère un signal sinusoïdale en fréquence et en amplitude.

La distance entre les thermocouples étant définie, la fréquence et l'amplitude de l'onde thermique à imposer à la surface de l'échantillon sont à déterminer.

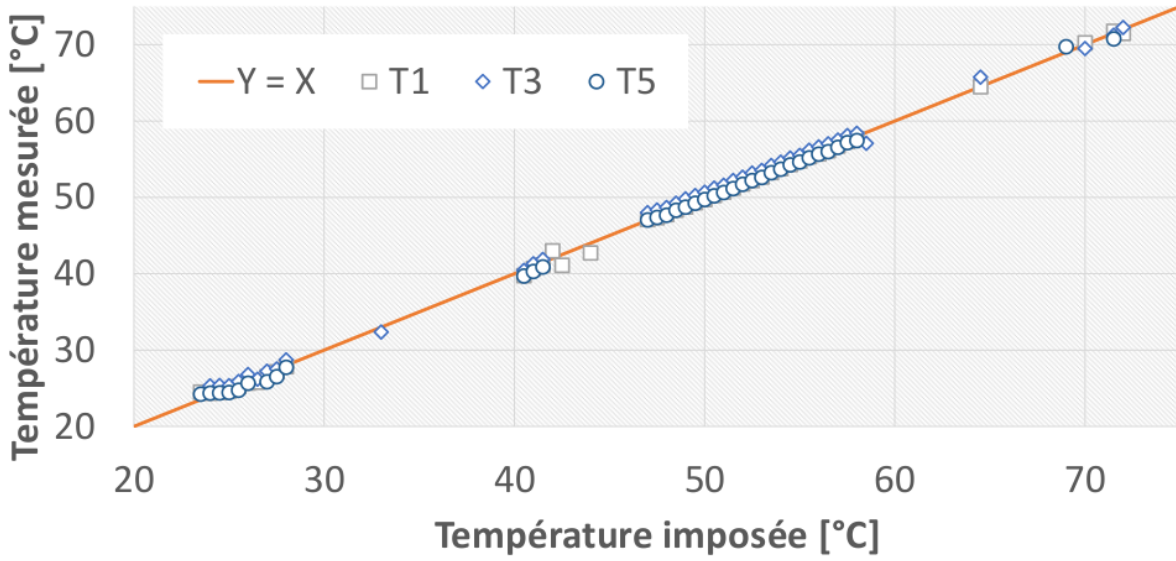


Figure 4.9 – Exemple de l'étalonnage des thermocouples pour la mesure de la température T_1 , T_3 et T_5 .

À partir de l'équation 4.4 qui décrit l'évolution de la température dans le sol, la profondeur d'*acceptation* z_a est déterminée en fonction de la fréquence et de l'amplitude de l'onde thermique. Elle correspond à la profondeur à laquelle l'oscillation de la température dans le sol est mesurable par un thermocouple. Pour assurer une précision des mesures inférieure à 5 % et en raison de l'incertitude des thermocouples qui est de $\pm 0,25$ °C, la variation de la température doit être au minimum de 5 °C. La profondeur d'*acceptation* z_a s'exprime par le terme de l'amortissement de la température du sol (équation 4.4). À partir de cette formule, la profondeur d'*acceptation* est calculée, voir l'équation 4.5

$$T_{ampl} \times e^{-z_a \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot D_{sol}}}} \geq 5 \Leftrightarrow z_a \leq -\ln\left(\frac{5}{T_{moy}}\right) \times \sqrt{\frac{2 \cdot D_{sol}}{\omega}} \quad (4.5)$$

La diffusivité thermique des sols présents autour d'un échangeur géothermique de surface est généralement comprise entre 0,2 et 2,0 $mm^2 \cdot s^{-1}$. Dans le cas où la propagation de la chaleur est la moins rapide, c'est-à-dire $D = 0,2$ $mm^2 \cdot s^{-1}$, la profondeur d'*acceptation* peut-être calculée en fonction de l'amplitude et de la fréquence de l'onde thermique d'excitation, voir la figure 4.10. Si la fréquence de l'onde thermique diminue et si son amplitude augmente alors, la profondeur d'*acceptation* augmente. Pour une amplitude de température supérieure à 5 °C à l'emplacement du thermocouple T_4 , la profondeur d'*acceptation* doit être supérieure à 40 mm. Cette condition est respectée pour des fréquences inférieures à 0,0001 $rad \cdot s^{-1}$ et pour des amplitudes supérieures à 25 °C. À partir de ces résultats, les paramètres de l'excitation thermique **retenus** sont une fréquence de 0,0001 $rad \cdot s^{-1}$ et une amplitude de 25 °C.

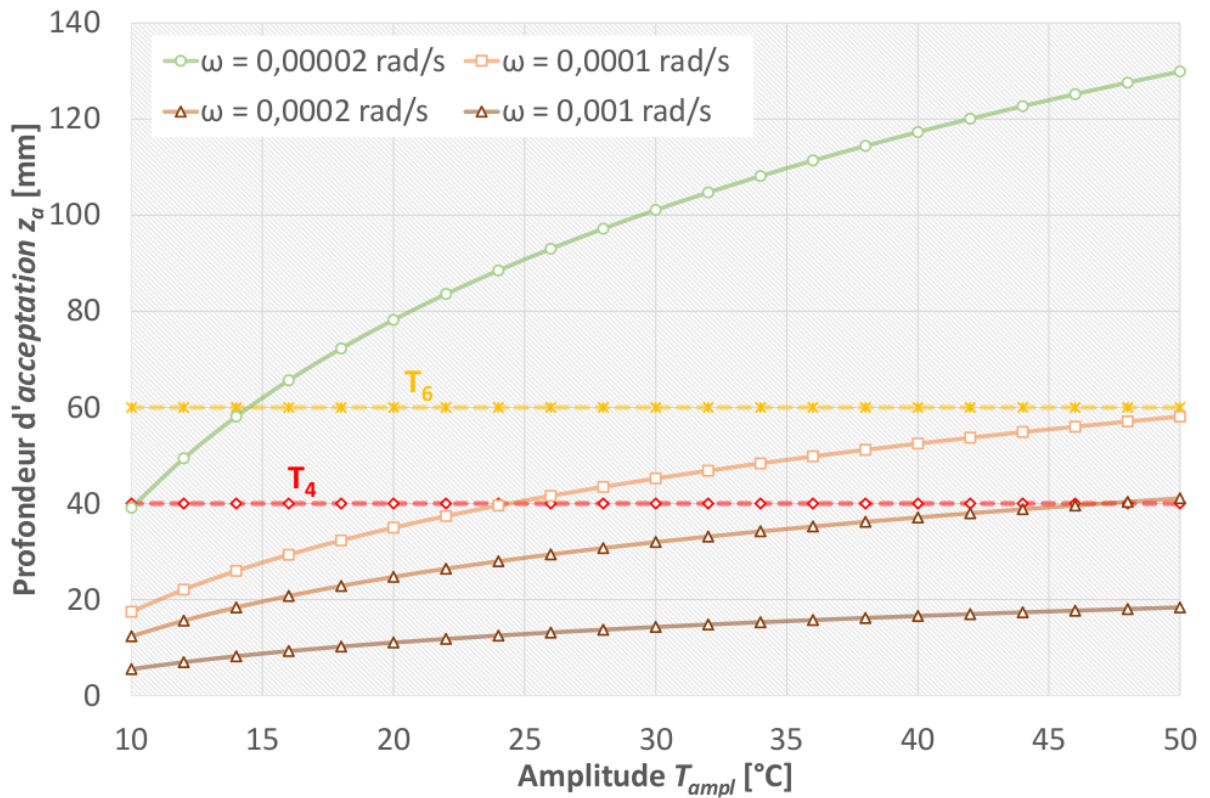


Figure 4.10 – Détermination des caractéristiques de l'onde thermique d'excitation.

Mesure de la compacité

La charge verticale appliquée sur l'échantillon risque d'engendrer une variation de sa compacité (réduction de son volume). Pour prendre en compte ce phénomène dans l'identification de la diffusivité thermique, il est nécessaire de mesurer le déplacement du piston au cours du temps. Un capteur de déplacement de type linéaire est positionné sur le piston appliquant la contrainte verticale.

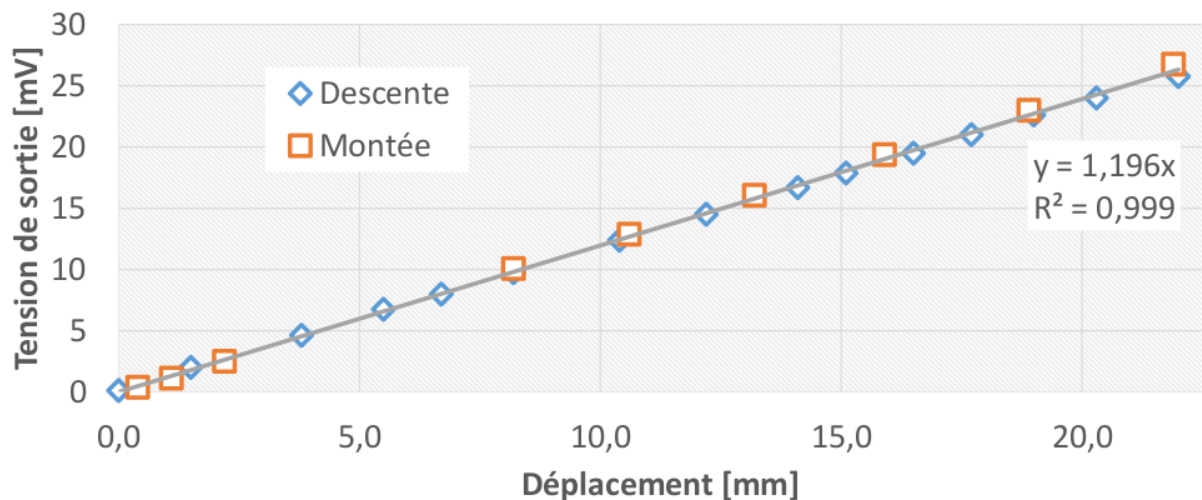


Figure 4.11 – Étalonnage du capteur de déplacement linéaire.

Un capteur de déplacement linéaire est constitué d'un potentiomètre composé d'une résistance fixe et d'un curseur mobile qui est solidaire mécaniquement à l'objet dont on veut connaître le déplacement. La valeur de la résistance du capteur dépend de la position du curseur. En alimentant le capteur par une tension connue, la tension délivrée par le capteur est proportionnelle au déplacement du curseur. Un étalonnage est réalisé à l'aide d'une table de translation (figure 4.12) pour connaître la relation entre la tension de sortie et le déplacement du curseur dans le sens de sa montée et de sa descente, voir figure 4.11.

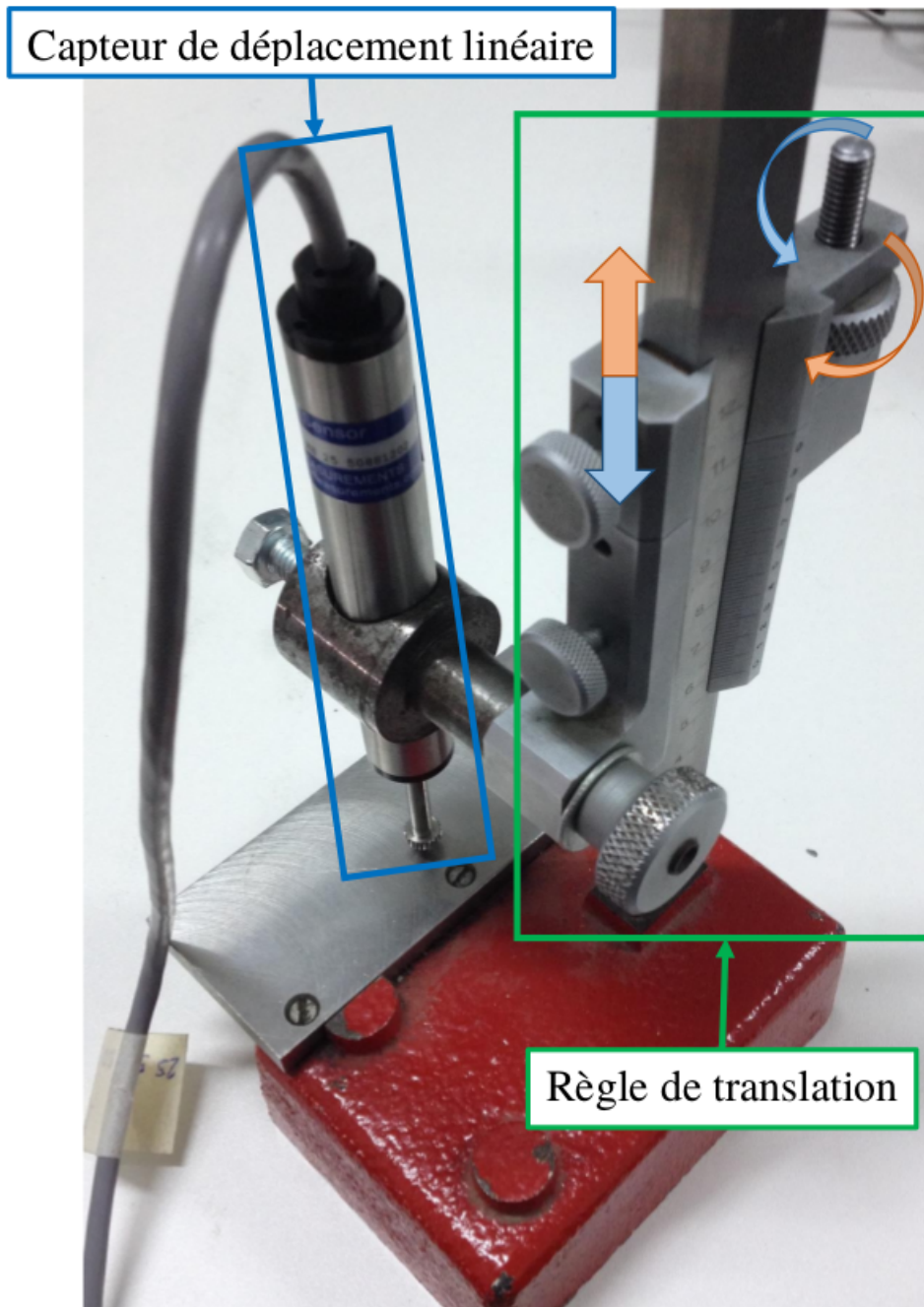


Figure 4.12 – Outil pour étalonner le capteur de déplacement linéaire.

Acquisition des données

L'acquisition des mesures (températures et déplacement) est réalisée par une carte *Arduino Due* toutes les secondes (vitesse maximale d'acquisition). Les tensions des thermocouples sont mesurées par les ports analogiques avec une résolution de 12 *bits* entre 0 et 5 V soit une sensibilité de 1 mV. La tension de sortie du capteur de déplacement est mesurée par un amplificateur programmable MCP3424 avec une résolution de 16 *bits* entre 0 et 2,048 V soit une sensibilité de 0,03 mV. La carte *Arduino Due* communique les données à un ordinateur qui les sauvegarde dans un fichier. L'instrumentation de l'odémètre est présentée par la figure 4.13.

Capteur	Type	Tension de sortie		Incertitude de la mesure
		Plage	incertitude	
Thermocouple	K	0-5 V	5 mV [0, 1 %]	0,25 °C
Déplacement	Résistance linéaire	0-25 mV	0,03 mV [0, 2 %]	0,1 mm

Tableau 4.2 – Récapitulatif de la métrologie de l'instrumentation de l'odémètre.

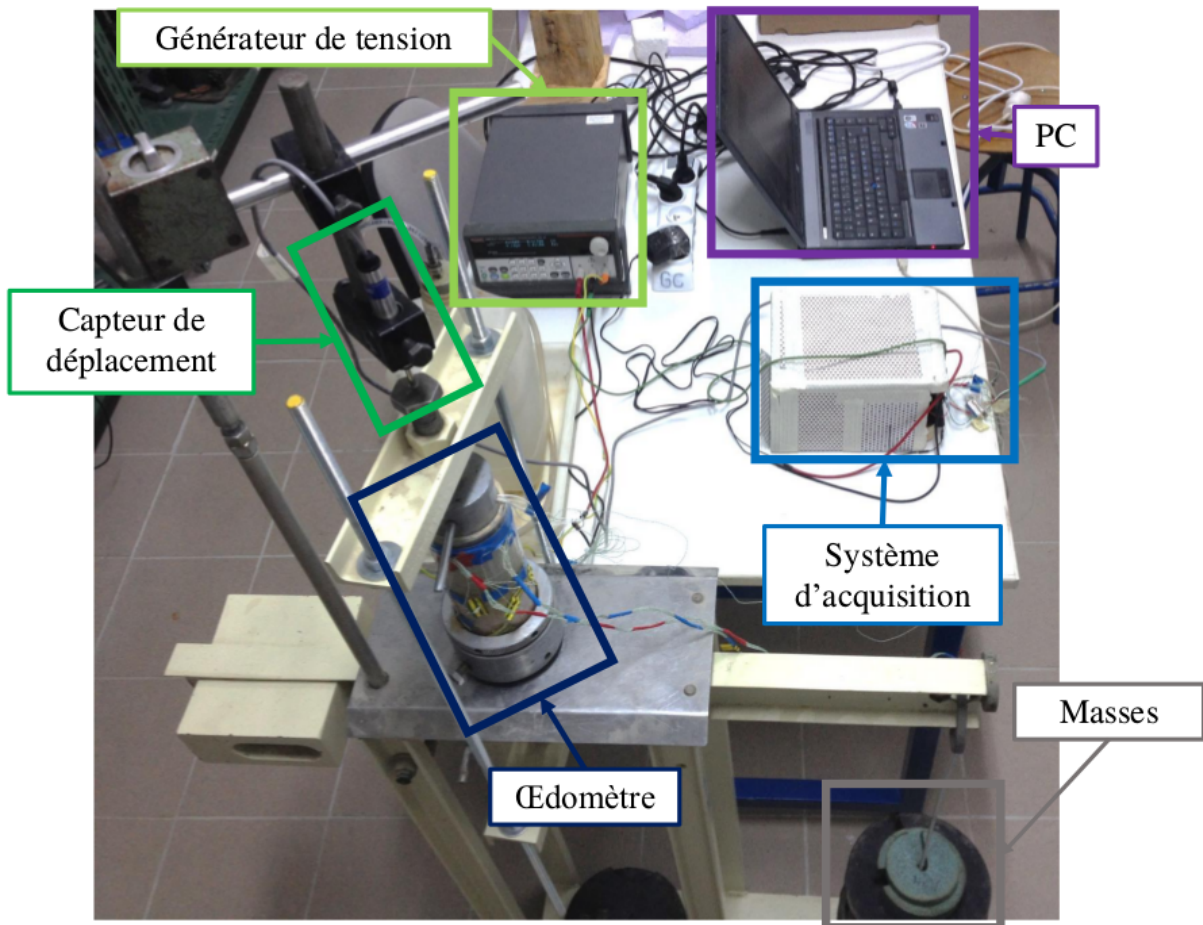


Figure 4.13 – Présentation du dispositif avec l'odémètre instrumenté, le capteur de déplacement, le générateur de tension, le système d'acquisition et l'ordinateur.

4.5 Méthode pour identifier la diffusivité thermique d'un sol poreux

L'œdomètre est instrumenté par une résistance chauffante pour exciter thermiquement l'échantillon à sa surface et par des thermocouples pour mesurer la réponse thermique. Le modèle 1D de la méthode en régime périodique présenté précédemment suppose un transfert de chaleur unidirectionnel, sans pertes thermiques latérales. Cette condition est vérifiée à partir d'un cas expérimental en régime permanent.

Un essai expérimental est réalisé en régime permanent (figure 4.14) avec la mesure de la température du sol à deux emplacements T_0 et T_3 , la température de la paroi du tube T_{p0} et T_{p3} et la température extérieure T_{ext} .

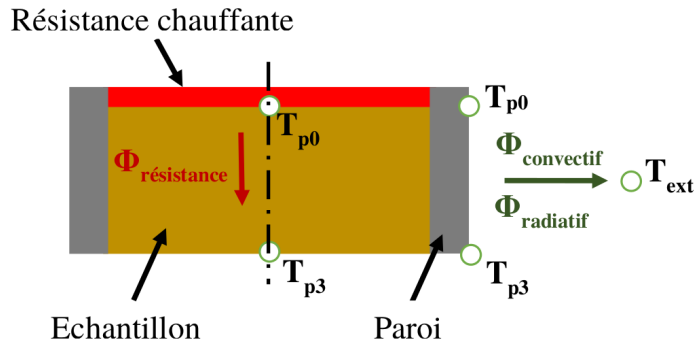


Figure 4.14 – Bilan thermique des transferts de chaleur.

Les échanges thermiques entre le tube et la température extérieure sont évalués par un flux convectif et un flux radiatif. Le flux convectif est évalué à partir de corrélations expérimentales [CC75] pour un échange de type naturel et une géométrie cylindrique. Le flux radiatif est estimé à partir de l'émissivité du tube et de la loi de Stefan Boltzmann.

Les pertes thermiques latérales l_{th} [%] sont déterminées par l'expression de l'équation 4.6 et sont estimées à 65 %.

$$l_{th} = \frac{\phi_{radiatif} + \phi_{convectif}}{\phi_{résistance}} \quad (4.6)$$

Cet essai expérimental met en évidence l'importance des échanges entre la paroi du tube et l'air extérieur devant le flux émis par la résistance chauffante.

Pour prendre en compte les transferts thermiques latéraux, un modèle numérique transitoire 2D axisymétrique par éléments finis est développé. Une identification de la diffusivité thermique du sol par réduction des écarts entre les mesures et le modèle numérique est mise en place en appliquant une onde thermique en régime périodique. Cette méthode est ensuite validée avec deux types de sol (sable et argile) à l'état sec et saturé en eau.

4.5.1 Modélisation des échanges thermiques

Cette partie présente la modélisation mise en place pour évaluer les échanges thermiques dans l'oedomètre et son interaction avec l'environnement. La modélisation est réalisée à partir d'une modélisation **numérique 2D transitoire par éléments finis**.

Modèle physique

Nous considérons une source de chaleur appliquée à la surface du sol de géométrie cylindrique. Le sol est confiné dans un tube en PMMA qui échange en convection et en rayonnement avec son environnement, voir la figure 4.15. Le but du modèle est de déterminer la température du sol à différentes profondeurs.

Les hypothèses du modèle sont les suivantes :

- en raison de la géométrie cylindrique, le problème est simplifié par une représentation 2D axisymétrique ;
- les éléments du dispositif sont considérés comme étant homogène et leurs propriétés thermo-physiques sont constantes au cours du temps et de la température ;
- les phénomènes de transferts de masse sont négligés en raison du faible volume de sol ;
- les échanges thermiques sont de type conductif dans les directions r et z de chaque élément du dispositif ;
- les échanges sont de type convectif et radiatif entre la paroi et l'air extérieur ;
- les éventuels échanges latents ne sont pas pris en compte ce qui revient à dire qu'il n'y a pas d'infiltration dans le tube.

Les conditions aux limites sont les suivantes :

- la température de l'air extérieur dépend du temps ;
- la température d'excitation appliquée à la surface de l'échantillon dépend du temps.

L'état initial du modèle est obtenu à partir d'un calcul en régime permanent en appliquant les conditions aux limites à l'instant initial. La simulation du modèle est réalisée par le logiciel libre *Code_Aster*® version 12 avec la commande *THER_LINEAIRE* qui résout l'équation de la chaleur 4.7.

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \phi_{prod} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.7)$$

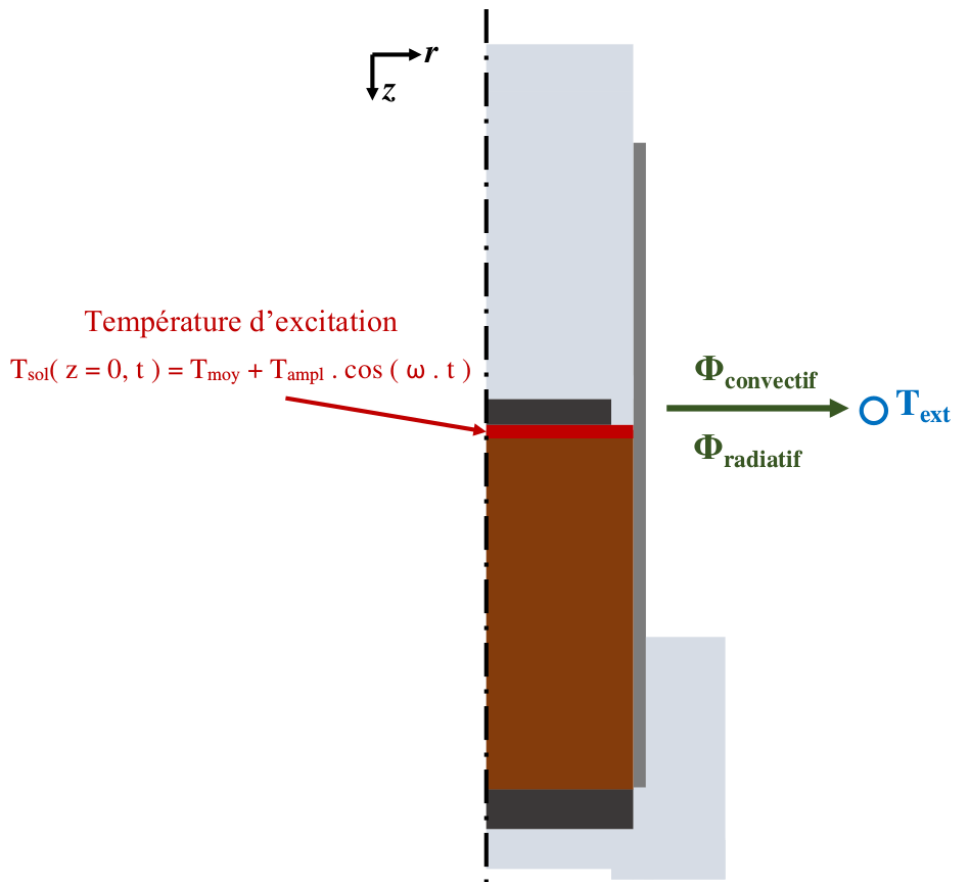


Figure 4.15 – Schéma de principe du modèle physique.

Chaque matériau est caractérisé par une conductivité thermique et une capacité thermique volumique constante au cours du temps et de la température. Leurs valeurs sont obtenues à partir de la norme VDI 4640 Part I [Unt10] et la norme NF EN 12524 [PG00]. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 4.3.

Matériau	Conductivité thermique λ [$W.m^{-1}.K^{-1}$]	Capacité thermique volumique C $\times 10^6$ [$J.m^{-3}.K^{-1}$]
Fer	80,0	3,37
Pierre poreuse	0,55	1,60
PMMA	0,030	1,73

Tableau 4.3 – Caractéristiques thermo-physiques des matériaux.

Maillage

Le dispositif expérimental est modélisé par une représentation axisymétrique 2D en considérant chaque matériau le constituant : piston, tube, socle, pierre poreuse, isolation en polystyrène, résistances chauffantes et échantillon de sol. Ce dernier est décomposé en plusieurs couches pour positionner chaque thermocouple. Des mailles à trois nœuds sont générées par le logiciel *GMSH*. La définition de la forme des mailles (triangles ou quadrilatères), de la taille des mailles et de l'ordre des mailles font suite à une étude de sensibilité, voir ci-dessous. Le maillage est représenté par la figure 4.16.

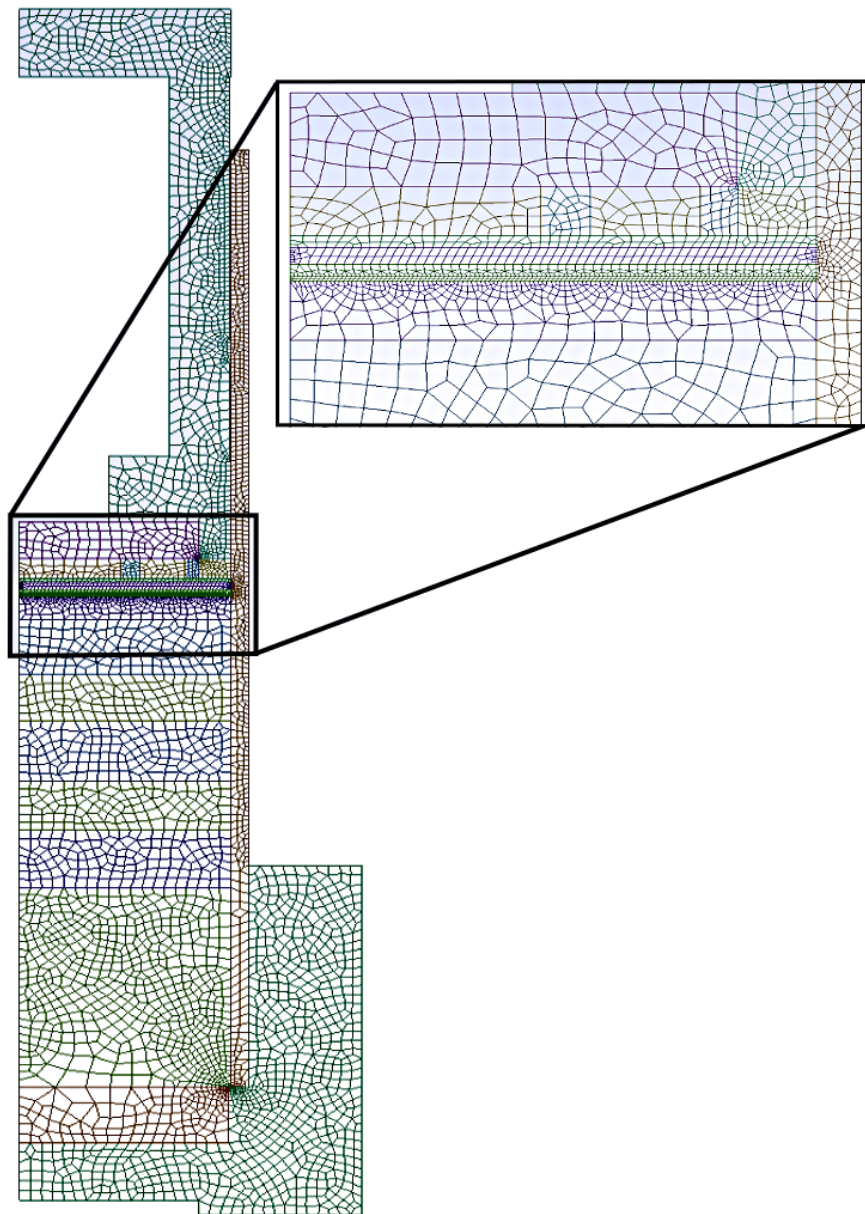


Figure 4.16 – Représentation du maillage du dispositif expérimental.

Étude de convergence de la simulation numérique

La précision des résultats d'une simulation numérique varie selon deux paramètres : la finesse du maillage et la finesse de la simulation. La finesse du maillage représente la précision spatiale des variations des inconnues du modèle et se définit par la taille et l'ordre (1, 2 et 3) des mailles ainsi que les fonctions d'interpolation qui décrivent la forme (triangle, quadrilatère, ...) des mailles. La finesse de la simulation représente l'évolution temporelle et se caractérise par la durée d'un pas de calcul entre deux itérations. Avec un mauvais paramétrage, c'est-à-dire un maillage grossier et un pas de calcul important, la simulation donne des résultats incorrects.

Une étude de sensibilité est réalisée avec les paramètres suivants :

- les ordres et les formes des mailles : *triangle* d'ordre 1 (3 nœuds), *triangle* d'ordre 2 (6 nœuds), *quadrilatère* d'ordre 1 (4 nœuds) et *quadrilatère* d'ordre 2 (8 nœuds) ;
- les tailles des mailles : de 0,7 mm à 35 mm ;
- les durées du pas de calcul : de 0,4 à 66,7 s.

Pour comparer chaque cas simulé, on détermine la **profondeur de pénétration** qui est la profondeur à laquelle la température imposée est diminuée d'un facteur e .

Les différents cas simulés, voir la figure 4.17, montrent l'impact de la taille, de la forme, de l'ordre des mailles et de la durée du pas de calcul sur la qualité des résultats. La forme des mailles n'influence pas significativement les résultats. Sur l'ensemble des résultats, la profondeur de pénétration a une allure asymptotique qui tend vers 0,09 m.

Pour une maille d'ordre 1, les mailles d'une taille supérieure à 5 mm ne convergent pas vers cette valeur mais c'est le cas pour les mailles inférieures à 2,5 mm. Pour l'ordre 2, les tailles de mailles inférieures ou égales à 5 mm sont suffisantes.

Pour la durée du pas de calcul, les valeurs convergent vers une même valeur lorsque la durée du pas de calcul est inférieure à 15 s.

Cette étude de sensibilité met en évidence la taille minimale de la maille (inférieure ou égale à 5 mm) et la durée minimale du pas de calcul (inférieure à 15 s) pour obtenir des résultats de simulation quasiment insensibles au maillage et à la durée du pas de calcul.

4.5. Méthode pour identifier la diffusivité thermique d'un sol poreux

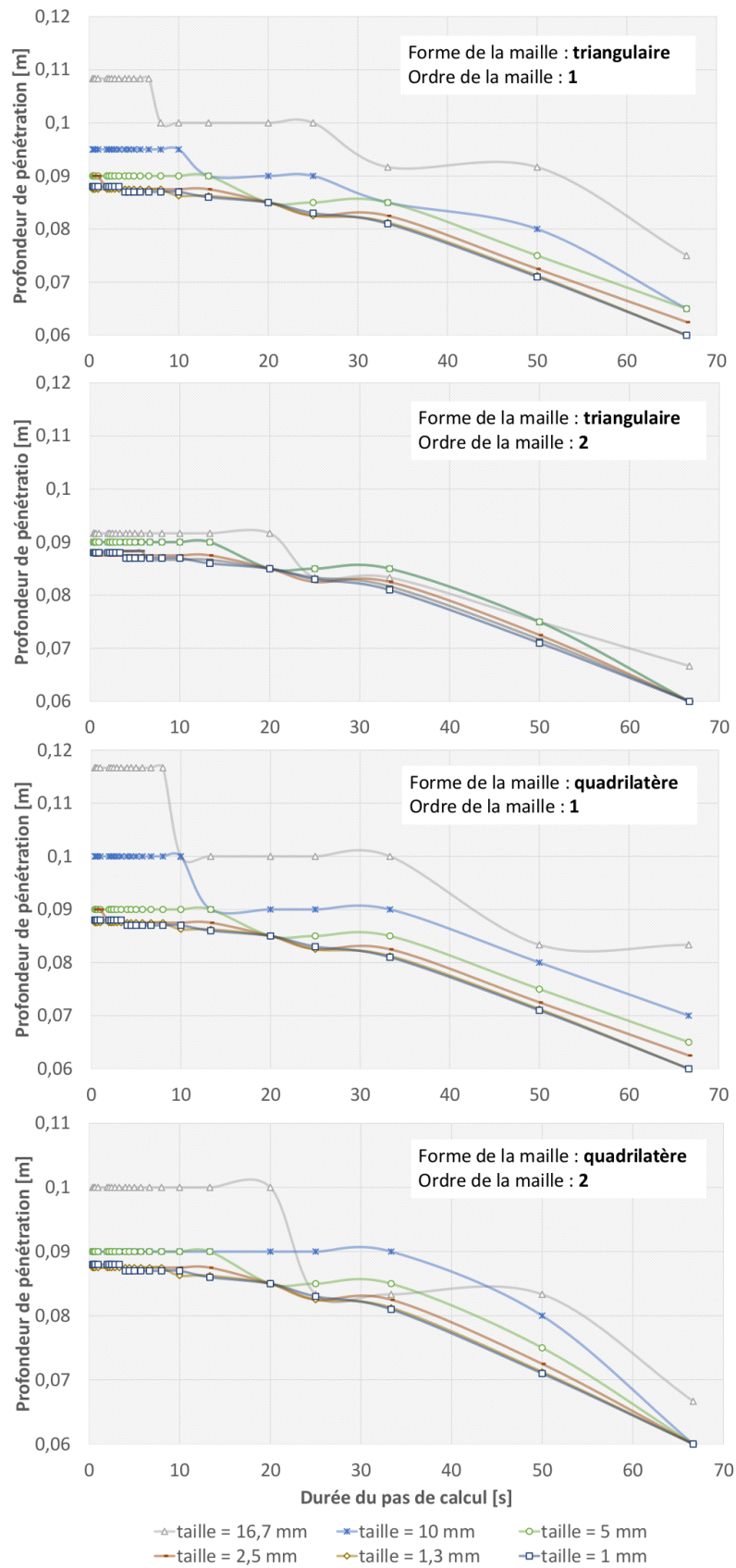


Figure 4.17 – Étude de sensibilité du pas de temps de calcul, de la taille des mailles, l'ordre des mailles et de la forme des mailles.

Identification de la diffusivité thermique d'un sol poreux

L'identification de la diffusivité thermique du sol est réalisée par une comparaison modèle/mesures par l'outil *PEST*[®] [PES04] à partir de l'algorithme de Levenberg-Marquardt. Ce dernier permet de calibrer un modèle numérique avec des données expérimentales en recherchant les solutions optimales afin de réduire l'écart entre le modèle numérique et les mesures (voir figure 4.18). L'outil *PEST*[®] est paramétré de manière à optimiser les valeurs de la diffusivité thermique du sol et du tube afin de réduire les écarts modèle/mesures.

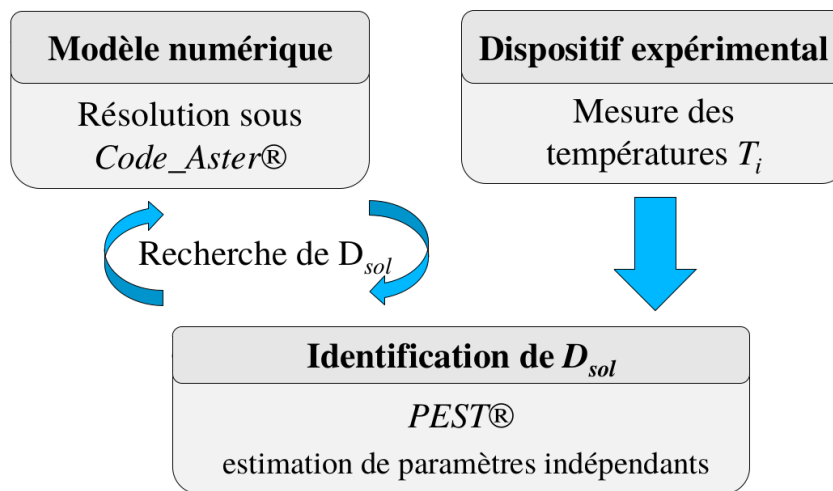


Figure 4.18 – Principe de la méthode pour identifier la diffusivité thermique d'un échantillon de sol.

4.5.2 Validation de la méthode pour identifier la diffusivité thermique

Le type de sol autour d'un échangeur air-sol est généralement soit du sable fin soit de l'argile fine. Une caractérisation thermique de ces deux types de sol est réalisée avec l'appareil KD2Pro afin de comparer et valider la méthode d'identification de la diffusivité thermique sans charge verticale.

4.5.2.1 Mesure avec l'appareil KD2Pro

L'appareil de mesure KD2Pro caractérise les propriétés thermo-physiques d'un sol en mesurant la réponse thermique d'un échantillon soumis à une excitation thermique. Il se compose de deux modules. Le premier est un système d'acquisition répondant aux fonctionnalités suivantes : acquisition des mesures, définition du protocole de mesures et caractérisation des propriétés thermo-physiques. Le second module correspond au choix du capteur. Trois capteurs sont fournis avec cet appareil pour diverses spécifications, voir le tableau 4.4.

Capteur	Taille	Grandeur mesurée	Plage de mesure
TR-1 (1 aiguille)	2,4 mm de diamètre	Conductivité thermique $\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,2 - 4,0 \pm 10 %
	100 mm de long		0,10 - 0,20 \pm 0,02
SH-1 (deux aiguilles)	1,3 mm de diamètre	Conductivité thermique $\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,2 - 2,0 \pm 10 % 0,02 - 0,20 \pm 0,01
	30 mm de long	Capacité thermique volumique $C [MJ.m^{-3}.K^{-1}]$	0,5 - 4,0 \pm 10 % 0,5 - 4,0 \pm 10 %
	espacé de 6 mm	Diffusivité thermique $D [mm^2.s^{-1}]$	0,10 - 1,00 \pm 0,02
KS-1 (1 aiguille)	1,3 mm de diamètre	Conductivité thermique $\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,2 - 2,0 \pm 5 %
	60 mm de long		0,02 - 0,20 \pm 0,01

Tableau 4.4 – Spécifications des capteurs KD2Pro.

Les capteurs sont composés soit d'une aiguille (TR-1 et KS-1) soit de deux aiguilles (KS-1), voir la figure 4.19. Le choix du capteur se porte sur SH-1 car la mesure de la *diffusivité thermique est possible* et le manuel d'utilisation préconise ce capteur pour des sols secs ou humides.

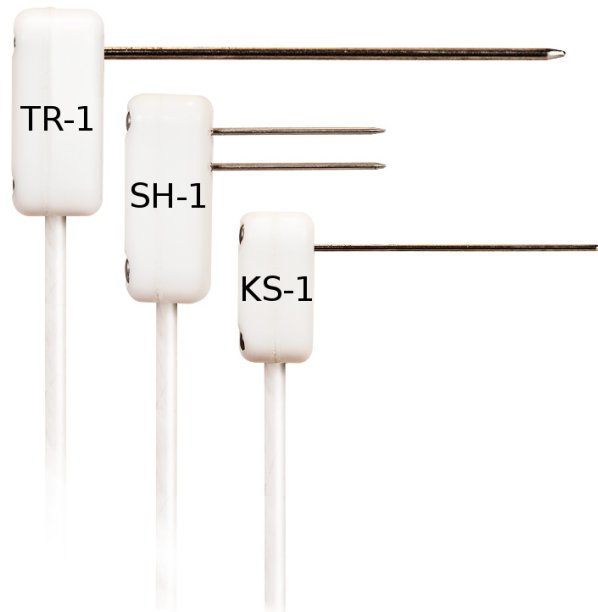


Figure 4.19 – Capteurs KD2Pro.

Procédure

La caractérisation des échantillons est réalisée à deux états d'humidité : l'un à l'état sec et l'autre à l'état saturé en eau.

L'état sec est réalisé en plaçant l'échantillon dans un four à 105 °C pendant 24 h. Il est ensuite refroidi à l'air ambiant pendant 4 h. L'état saturé est obtenu avec l'ajout d'eau dans l'échantillon (qui est à l'état sec) et jusqu'à obtenir sa saturation en eau.

Les échantillons sont placés dans des seaux de 5 cm de diamètre et 10 cm de hauteur afin d'immerger complètement le capteur. Une fois ce dernier mis en place, la mesure dure 5 minutes. Chaque échantillon est soumis à trois mesures. La mesure nécessite de chauffer le sol et pour éviter des mesures erronées, une attente de 30 min est respectée entre chaque mesure afin de retrouver l'état thermique en régime stationnaire.



Figure 4.20 – Exemple de la caractérisation d'un échantillon. À gauche : argile à l'état sec. Au centre : appareil de mesure KD2Pro. À droite : argile saturé en eau.

Les résultats des différentes mesures sont récapitulés dans le tableau 4.5.

Sol	État d'humidité	Diffusivité thermique D [$mm^2 \cdot s^{-1}$]
Sable fin	sec	$0,28 \pm 0,03$
	saturé en eau	$0,95 \pm 0,05$
Argile fin	sec	$0,32 \pm 0,05$
	saturé en eau	$0,70 \pm 0,06$

Tableau 4.5 – Caractérisation de la diffusivité thermique du sable fin et de l'argile fine à l'état sec et saturés en eau avec l'appareil de mesure KD2Pro.

4.5.2.2 Identification de la diffusivité thermique

La méthode d'identification de la diffusivité thermique à l'aide de l'outil *PEST*® et le modèle numérique est appliquée pour les échantillons de sable fin et d'argile qui sont soit à l'état sec soit à l'état saturé en eau.

Procédure

Les essais suivent la procédure suivante :

- le remplissage de l'œdomètre avec le positionnement des thermocouples ;

- l'attente de l'établissement du régime périodique ;
- l'acquisition des mesures ;
- l'identification de la diffusivité thermique avec une comparaison modèle/mesures.

Chaque échantillon est testé à trois reprises. Un exemple de la comparaison de l'évolution de la température du sol entre le modèle et les mesures, faisant suite à l'identification de la diffusivité thermique du sol, est présenté par la figure 4.21.

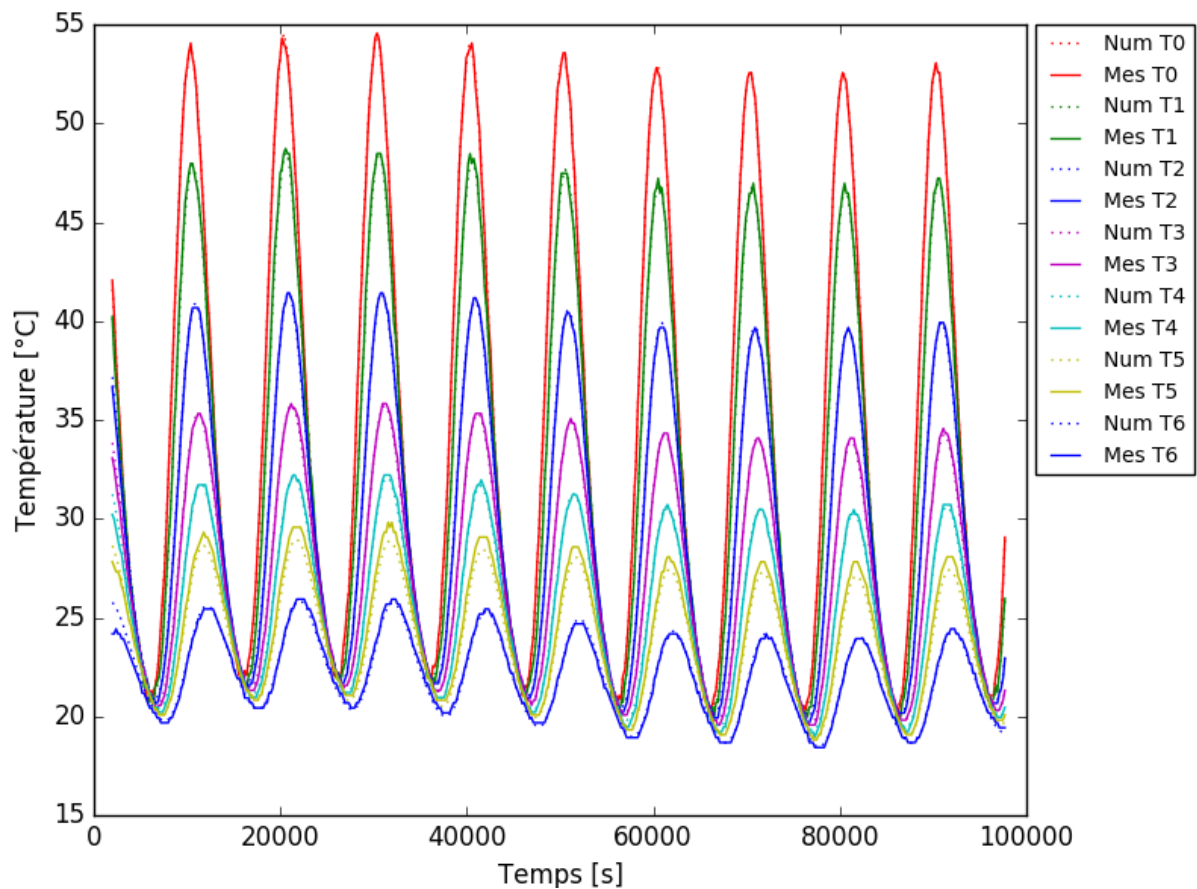


Figure 4.21 – Exemple des températures du sol mesurées ("Mes Ti") et prédites par le modèle numérique ("Num Ti") à l'emplacement de chaque thermocouple faisant suite à l'identification de la diffusivité thermique d'un échantillon.

Résultats de l'identification de la diffusivité thermique

Le tableau 4.6 présente les résultats de la diffusivité thermique obtenus à partir de la littérature (norme VDI 4640 Part I [Unt10]), des mesures réalisées avec l'appareil KD2Pro et de la méthode d'identification avec le modèle numérique.

Les valeurs de la diffusivité thermique obtenus par la méthode d'identification sont sensiblement égales à celles de la littérature (norme VDI 4640 Part I [Unt10]) et celles mesurées avec l'appareil KD2Pro. Ainsi, cette méthode est **validée** pour du sable fin et de l'argile fine à deux états d'humidité (sec et saturé en eau).

Sol	État d'humidité	Diffusivité thermique D [$mm^2.s^{-1}$]		
		Littérature [Unt10]	KD2Pro	Modèle numérique
Sable	sec	$0,28 \pm 0,04$	$0,28 \pm 0,03$	$0,27 \pm 0,02$
	saturé en eau	$0,96 \pm 0,05$	$0,95 \pm 0,05$	$0,99 \pm 0,04$
Argile	sec	$0,32 \pm 0,05$	$0,32 \pm 0,05$	$0,24 \pm 0,03$
	saturé en eau	$0,74 \pm 0,08$	$0,70 \pm 0,06$	$0,71 \pm 0,03$

Tableau 4.6 – Identification de la diffusivité thermique du sable et de l'argile à l'état sec et saturé en eau.

À partir de cette méthode d'identification, l'influence de la charge verticale sur la diffusivité thermique de ces échantillons est étudiée.

4.6 Étude de la charge verticale sur la diffusivité thermique d'un sol

La diffusivité thermique des échantillons de sable fin et d'argile fine est étudiée pour des charges verticales de 28,3, 56,7 et 141,7 kPa équivalentes aux profondeurs de l'ordre de 10, 20 et 50 m . Une procédure est élaborée et appliquée pour chaque essai.

Procédure

La procédure pour chaque essai est la suivante :

- le remplissage de l'œdomètre avec le positionnement des thermocouples ;
- l'attente de l'établissement du régime périodique ;
- le lancement de l'acquisition des mesures ;
- l'application des charges de 28,3, 56,7 et 141,7 kPa avec une mesure de 72 h pour chaque charge afin d'assurer la fin de tassement du sol ;
- l'identification de la diffusivité thermique avec une comparaison modèle/mesure.

4.6.1 Cas du sable fin à l'état sec et saturée en eau

Le premier type de sol étudié est du sable fin. Les résultats de l'identification de la diffusivité thermique à l'état sec et saturé en eau soumis à trois charges sont récapitulés dans le tableau 4.7.

À l'état sec, la charge verticale n'influence pas la diffusivité thermique car sa valeur est *constante* indépendamment de la charge verticale dans la gamme des contraintes comprises entre 28,3 et 141,7 kPa . À l'état saturé en eau, l'incertitude sur l'identification de la diffusivité thermique ne permet pas de donner des tendances précises. Néanmoins, nous

remarquons une légère diminution de la diffusivité thermique avec l'augmentation de la charge.

Concernant le volume de l'échantillon, celui-ci diminue avec l'augmentation de la contrainte verticale. Par rapport à son volume initial qui est de $68,1 \pm 0,1 \text{ cm}^3$, le volume diminue au maximum de 1,5 % (charge de $141,7 \text{ kPa}$ à l'état saturé en eau).

En outre, la valeur de la diffusivité thermique est très différente avec un rapport d'environ de 4 entre l'état sec et saturé indépendamment des contraintes appliquées.

État d'humidité	Contrainte verticale [kPa]	Diffusivité thermique D [$mm^2.s^{-1}$]	Volume de l'échantillon [$\times 10^{-6} m^3$]
état sec	28,3	$0,27 \pm 0,02$	$68,1 \pm 0,1$
	56,7	$0,27 \pm 0,02$	$68,0 \pm 0,1$
	141,7	$0,28 \pm 0,02$	$67,7 \pm 0,1$
état saturé	28,3	$1,02 \pm 0,05$	$68,1 \pm 0,1$
	56,7	$0,97 \pm 0,05$	$67,8 \pm 0,1$
	141,7	$0,96 \pm 0,05$	$67,1 \pm 0,1$

Tableau 4.7 – Résultats de l'étude de l'influence de la charge verticale sur la diffusivité thermique d'un sable fin.

4.6.2 Cas de l'argile à l'état sec et saturée en eau

Le second type de sol étudié est de l'argile fine. Les résultats de l'identification de la diffusivité thermique à l'état sec et saturé en eau soumis à trois charges sont récapitulés dans le tableau 4.8.

À l'état sec, les résultats montrent que la valeur de la diffusivité thermique est *quasi-constante* indépendamment de la charge verticale. Il semble donc que la charge verticale n'influence pas la diffusivité thermique du sol à l'état sec. Par contre, à l'état saturé en eau, malgré une augmentation de l'erreur de identification, la diffusivité thermique diminue légèrement avec l'augmentation de la charge.

À propos du volume de l'échantillon, son comportement est le même que celui-ci du sable : il diminue avec l'augmentation de la contrainte verticale mais avec une variation beaucoup plus importante. Par rapport à son volume initial qui est de $73,0 \pm 0,1 \text{ cm}^3$, le volume diminue au maximum de 7,9 % (charge de $141,7 \text{ kPa}$ à l'état sec).

Par ailleurs, la différence de la diffusivité thermique entre l'état sec et saturé est significative avec un rapport de l'ordre de 2. Dans la gamme des contraintes appliquées entre $28,3$ et $141,7 \text{ kPa}$, ce rapport est constant.

État d'humidité	Contrainte verticale [kPa]	Diffusivité thermique D [$mm^2 \cdot s^{-1}$]	Volume de l'échantillon [$\times 10^{-6} m^3$]
état sec	28,3	$0,35 \pm 0,02$	$67,9 \pm 0,1$
	56,7	$0,34 \pm 0,02$	$67,8 \pm 0,1$
	141,7	$0,34 \pm 0,02$	$67,2 \pm 0,1$
état saturé	28,3	$0,81 \pm 0,05$	$72,7 \pm 0,1$
	56,7	$0,75 \pm 0,05$	$72,1 \pm 0,1$
	141,7	$0,72 \pm 0,05$	$69,0 \pm 0,1$

Tableau 4.8 – Résultats de l'étude de l'impact de la charge verticale sur la diffusivité thermique d'une argile fine.

4.6.3 Conclusion

Les deux séries d'essais expérimentaux avec du sable et de l'argile montrent que l'influence de la charge verticale sur la diffusivité thermique est *négligeable* par rapport à l'influence de l'état de saturation en eau pour des contraintes verticales inférieures à $141,7 kPa$. Par ailleurs, nous remarquons une incertitude relativement importante (de l'ordre de 10 %) pour les essais à l'état saturé. Il serait donc intéressant d'améliorer cette méthode en diminuant l'incertitude avec par exemple des mesures de température plus précises.

À propos du volume de l'échantillon, un point intéressant est sa diminution avec l'augmentation de la contrainte. En considérant la masse de l'échantillon constante durant l'essai (hypothèse justifiée par le fait que l'échantillon est confiné), sa masse volumique diminue de 1,5 % pour le sable et de 7,9 % pour l'argile. Par contre, cette variation est beaucoup moins importante que celle de la diffusivité thermique entre l'état sec et l'état saturé. Les rapports de diffusivité sont compris entre 2 et 4 ce qui montre que la *contrainte verticale* est un *facteur de deuxième ordre* comparé à celui du type de sol et de l'état de saturation en eau.

4.7 Bilan du chapitre

Ce chapitre se consacre à l'étude de la diffusivité thermique d'un sol poreux sous l'influence de l'état de saturation en eau, du type de sol et de la charge verticale. Afin d'identifier la diffusivité thermique d'un sol poreux sous une charge, une méthode en *régime périodique* est développée. Le principe de la méthode consiste à imposer une excitation thermique et une charge verticale sur l'une des faces de l'échantillon et de mesurer la réponse thermique à différentes profondeurs. La diffusivité thermique du sol est ensuite identifiée à partir d'une comparaison entre les mesures et un modèle numérique (2D transitoire par éléments finis). Deux types d'échantillons de sol (sable fin et argile) à l'état sec et saturé en eau sont utilisés pour *valider l'identification*.

À partir de cette méthode d'identification, deux séries d'essais expérimentaux sont menées en appliquant différentes contraintes verticales. Les résultats ont montré que par rapport à l'état de saturation, la charge verticale *n'influence pas significativement la diffusivité thermique pour les sols à l'état sec* enfouis à une profondeur inférieure à 50 m (contrainte inférieure à 140 kPa).

Suite à cette conclusion, nous étudions ensuite les impacts climatiques et géologiques sur l'efficacité énergétique d'un échangeur air-sol en variant l'humidité et le type de sol.

Étude des performances énergétiques d'un échangeur de surface

5.1 Contexte et objectifs

Dans le chapitre 2, faisant suite à une étude bibliographique, l'impact des conditions climatiques et géologiques sur les performances énergétiques d'un échangeur de surface est mise en évidence. Ces performances sont en lien directes avec les propriétés thermo-physiques du sol autour des échangeurs qui eux-mêmes dépendent des conditions hydriques (teneur en eau) et mécaniques (compacité) du sol. Deux "verrous" scientifiques sont étudiés avec l'élaboration de deux études expérimentales : l'humidité du sol sous l'influence de la précipitation de la pluie et l'impact de l'humidité du sol, du type de sol et de la charge verticale sur les propriétés thermo-physiques d'un sol. Les résultats de ces deux études (respectivement, les chapitres 3 et 4) montrent une augmentation significative de la teneur en eau d'un sol soumis un événement pluvieux et une variation des propriétés thermo-physiques d'un sol poreux sous l'influence de l'état de saturation et du type de sol soumis à différentes charges verticales. Dans ce contexte, ce chapitre étudie *les performances énergétiques d'un échangeur géothermique de surface sous l'influence du type de sol (à long terme) et d'un événement pluvieux (à court terme)*.

Cette dernière étape de ce travail de thèse est de **quantifier** l'influence des conditions météorologiques et géologiques sur les performances énergétiques d'un échangeur géothermique de surface. Le choix de l'échangeur se porte sur un échangeur air-sol car la *validation expérimentale* est possible avec les mesures réalisées sur l'échangeur air-sol expérimental de la plateforme géothermique (partie 1.3.2). Une modélisation d'un **échangeur air-sol** est donc **entreprise**. Un résumé succinct des modèles existants est présenté par la suite afin de situer les attentes de la modélisation.

Les premiers modèles *analytiques* d'échangeur air-sol se limitent à une configuration linéaire avec la prise en compte d'un échange de convection forcée entre la température de l'air circulant dans l'échangeur air-sol et la température du sol [Boj97; BS03; PJ03; GT06]. La température du sol se résout en appliquant l'équation de la chaleur dans un milieu semi-infini et en imposant la température de l'air extérieur comme la condition aux limites. Cette dernière se modélise par une fonction sinusoïdale de fréquence annuelle

et journalière dépendante de la profondeur et du temps. L'inconvénient de ces modèles est qu'ils ne prennent pas en compte l'impact thermique de l'échangeur sur le champ de température du sol. Ce point est amélioré par Hollmuler [Hol02] en considérant les perturbations thermiques engendrées par l'échangeur thermique. Son modèle impose une condition aux limites, soit isotherme soit adiabatique à une certaine distance de l'échangeur. Cependant, son modèle ne prend pas en compte la variation de la température du sol à cause des conditions météorologiques. Les travaux de Thiers [Thi08] et de Dunand [Dun82] décomposent le problème thermique de l'échangeur air-sol en plusieurs phénomènes thermiques élémentaires tels que la présence de plusieurs échangeurs dans le sol et l'impact de bâtiments sur le champ de température du sol. L'inconvénient de ces modèles analytiques est de supposer un sol **homogène** avec des propriétés thermo-physiques **constantes** au cours de temps. Ces hypothèses ne correspondent pas aux conditions réelles d'un échangeur air-sol avec la présence du sol d'enrobage. Dans ce cas, les modèles *analytiques* ne peuvent donc pas être appliqués.

L'hétérogénéité du sol et la variabilité de la température de l'air sont prises en compte par les modèles *numériques* avec une modélisation plus précises des conditions réelles [MSA94 ; Pie96 ; Gan14] mais ces modèles numériques ne prennent pas en compte l'**hétérogénéité du sol** comme la présence du lit de pose. Afin de prendre en compte les différents *types de sol*, le choix de la modélisation se porte vers le développement d'un **nouveau modèle numérique**.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier *l'influence des conditions climatiques sur les performances énergétiques d'un échangeur air-sol* à l'aide d'une *modélisation numérique* de ce système.

Le développement du modèle numérique et de l'étude suivent les étapes suivantes :

- la modélisation numérique d'un échangeur air-sol avec deux modèles distincts : un modèle du champ de température du sol et un modèle de la température de l'air dans l'échangeur ;
- la validation expérimentale du modèle du champ de température du sol ;
- la validation expérimentale du modèle de la température de l'air circulant dans l'échangeur ;
- l'étude des performances énergétiques à long terme d'un échangeur air-sol sous l'influence de différents types et différentes humidités du sol ;
- l'étude des performances énergétiques à court terme d'un échangeur air-sol sous l'influence d'un événement pluvieux.

Les différents résultats de l'étude permettront d'enrichir les connaissances sur les facteurs influençant les performances énergétiques d'un échangeur géothermique de surface. À partir de ces résultats, des solutions technologiques seront proposées pour **augmenter** les performances énergétiques d'un échangeur air-sol.

5.2 Modélisation numérique d'un échangeur air-sol

L'échangeur air-sol expérimental de la plateforme géothermique est présenté en détails dans la partie 1.3 du chapitre 1. L'originalité de cet échangeur est la présence de plusieurs sols d'enrobage : sable, mélange sable + bentonite (4 %) et remblai in-situ. Chaque enrobage est instrumenté sur une coupe verticale par des mesures de températures du sol et de températures de l'air à l'intérieur de l'échangeur. La température de l'air est aussi mesurée à l'entrée et à la sortie de l'échangeur. Un rappel des caractéristiques et de l'instrumentation des coupes verticales sont présentés sur les figures 5.2 et 5.1. Le principe de la modélisation de cet échangeur est présenté par la suite.

- ✕ Capteur de températures
- ✕ Capteur d'humidité du sol

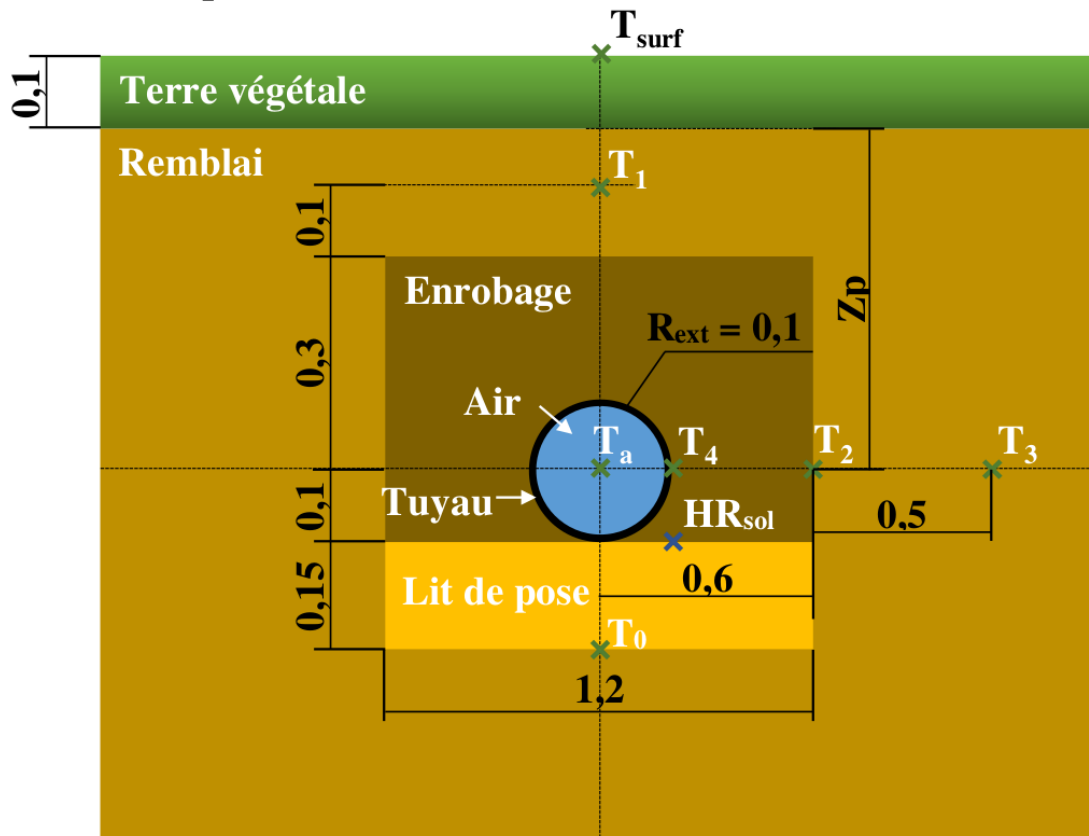


Figure 5.1 – Schéma de la coupe verticale d'un échangeur air-sol avec les différents types de sols présents.

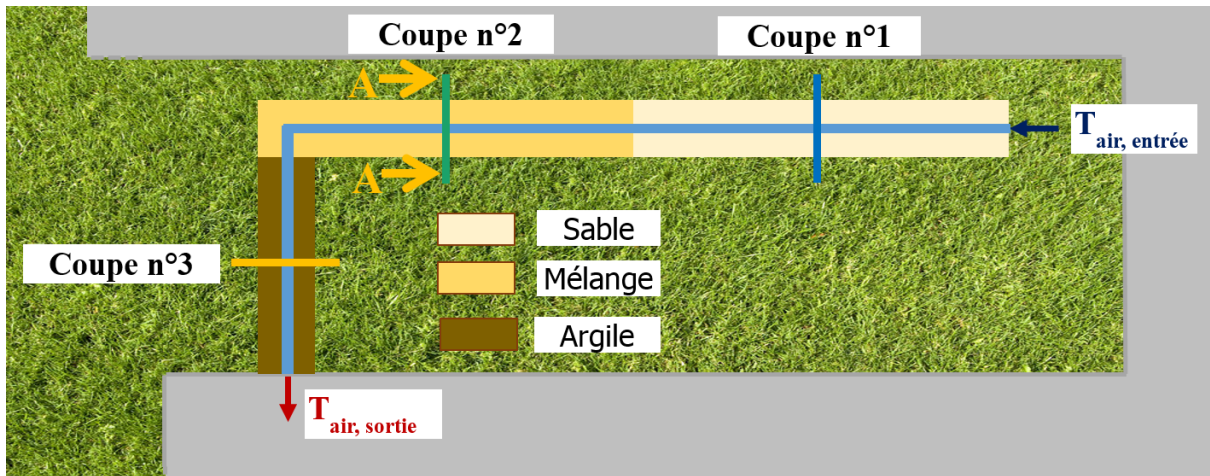


Figure 5.2 – Schéma vue de dessus de l'échangeur air-sol expérimental avec la position des trois coupes verticales instrumentées. Les positions des capteurs sont détaillées sur la figure 5.1.

5.2.1 Principe de l'algorithme de modélisation

La procédure de la modélisation de l'échangeur air-sol, schématisée par la figure 5.3, se base sur l'algorithme de calcul utilisé par Trombe et Bourret [TB93] pour déterminer la température de l'air en sortie d'un échangeur air-sol mais enrichi par une résolution **numérique 2D** de la température du sol. La principale hypothèse de cet algorithme est de considérer une température constante à la surface du sol T_{surf} quand l'air circule dans l'échangeur (la boucle sur les sections est effectuée). Par conséquent, la température de l'air dans l'échangeur air-sol est obtenue par deux algorithmes distincts mais imbriqués. Le premier modèle a pour but de déterminer le champ de température dans le sol (noté T_{sol}) à un instant t et avec la température à la surface du sol $T_{surf}(t)$. Le deuxième modèle a pour but de calculer (à T_{surf} constant) les échanges thermiques entre l'air de l'échangeur et le sol sur toute sa longueur afin d'en déduire la température d'air en sortie $T_{a,sortie}$.

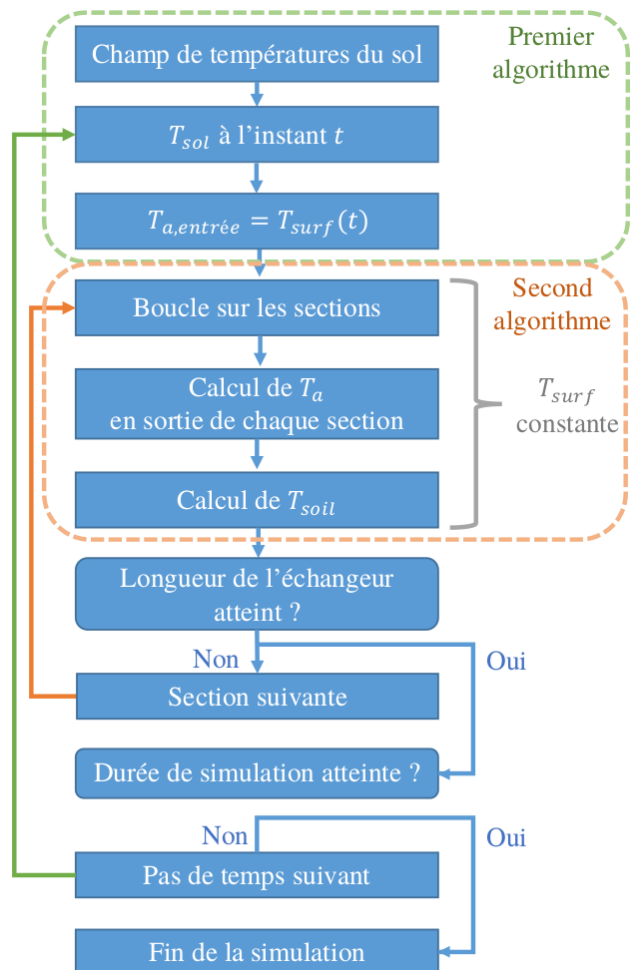


Figure 5.3 – Principe de l'algorithme utilisée pour calculer la température de l'air dans un échangeur air-sol.

5.2.2 Modélisation du champ de température du sol

Le premier modèle quantifie les échanges thermiques dans le sol. Les différents types de sol présents sont caractérisés par des propriétés thermo-physiques constantes au cours du temps et représentés par les sols suivants :

- la terre végétale : représente le sol à la surface ;
- le remblai : sol naturel présent lors de l'enfouissement de l'échangeur ;
- l'enrobage : sol qui entoure l'échangeur ;
- le tube : tube qui sépare physiquement l'air et sol ;
- le lit de pose : couche de sable fin compactée pour assurer la pente de l'échangeur.

Modèle physique

Les conditions aux limites sont les suivantes :

- T_{surf} : la température à la surface du sol donne la condition à la surface du sol ;
- T_{air} : la température de l'air à l'intérieur du tube ;
- T_{geo} : la température géothermique (constante au cours du temps) conditionne la condition à la limite du dessous ;
- ϕ_g et ϕ_d : les flux de chaleur aux conditions latérales sont considérés nuls.

Les conditions latérales supposent des flux de chaleur nuls comme première approche car ces flux sont complexes à prendre en compte. En effet, ils dépendent des caractéristiques de l'environnement autour de l'échangeur : présence de bâtiments, nappe phréatique, présence d'un deuxième échangeur, etc ... qui impactent sur la température du sol. Ces flux latéraux de chaleur nécessitent une étude spécifique car ces flux sont difficilement prévisibles selon les conditions de chauffage des bâtiments, des propriétés thermo-physiques de ses parois, de la disposition de l'échangeur avec son environnement, etc ... C'est pourquoi ce modèle *néglige les flux de chaleur latéraux*.

L'échange convectif de chaleur entre le tube et l'air est défini par le coefficient d'échange convectif h_a . Celui-ci est constant au cours du temps car la vitesse de l'air circulant dans l'échangeur est imposée par un ventilateur fonctionnant en permanence. Le champ de température initial est obtenu par un calcul en régime stationnaire avec les conditions aux limites à l'instant initial $T_{surf}(t = 0)$. Concernant la résolution numérique, le système linéaire est résolu par un schéma implicite d'Euler avec un pas de temps correspondant à l'intervalle entre deux mesures qui est de 20 minutes.

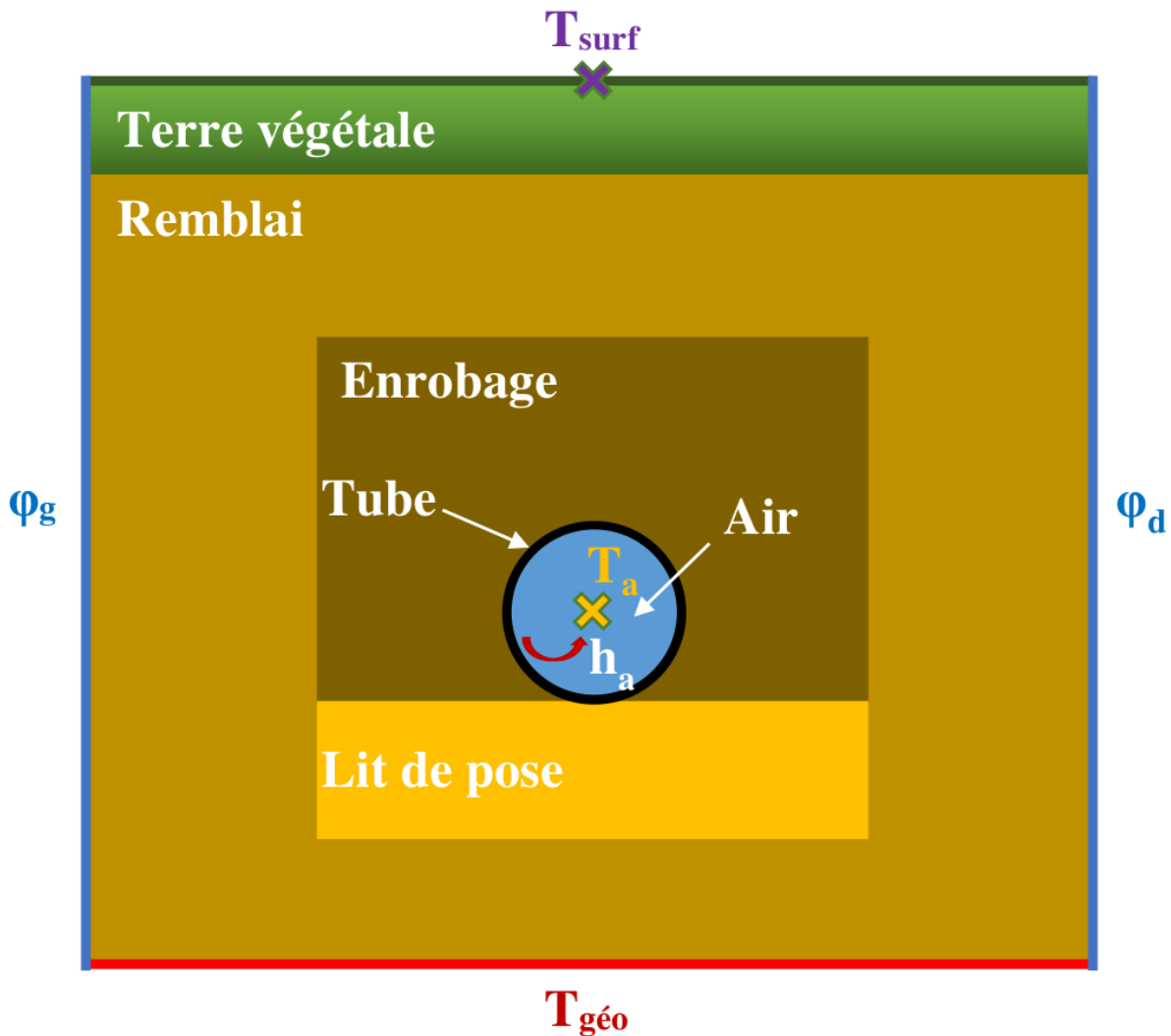


Figure 5.4 – Schéma des conditions aux limites.

Maillage

Le champ de température du sol d'une coupe verticale est obtenu en résolvant l'équation de la chaleur avec le programme par éléments finis *Code_Aster*®. La discrétisation spatiale de la coupe verticale est réalisée par des mailles triangulaires d'ordre 1 (trois nœuds) et raffinée autour du tube de l'échangeur pour une meilleure précision de calcul. Les mailles deviennent de plus en plus grandes lorsqu'elles se dirigent vers le bas pour un gain en temps de calcul.

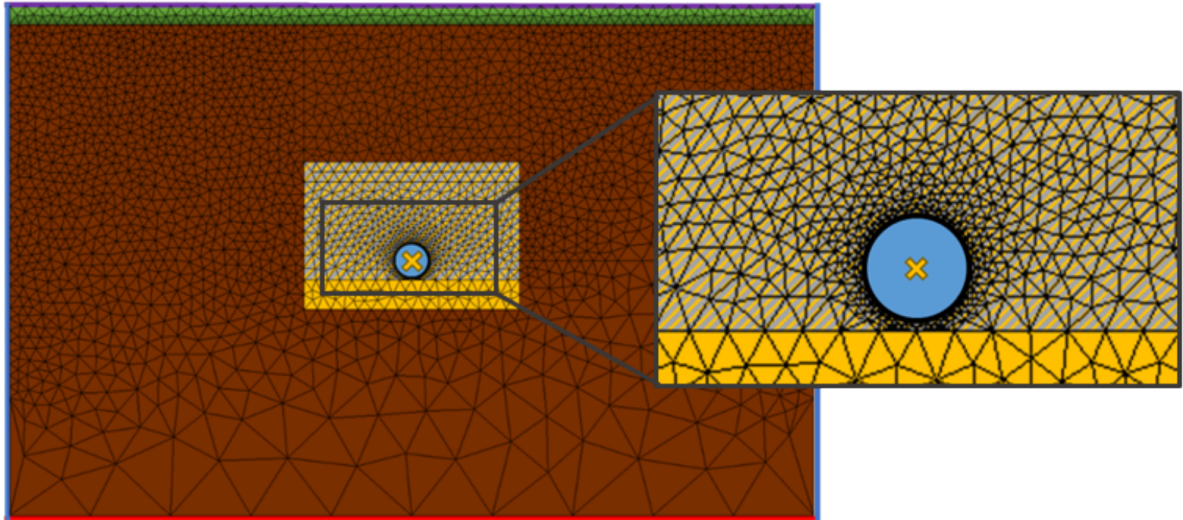


Figure 5.5 – Représentation du maillage du modèle numérique 2D.

5.2.3 Modélisation de la température de l'air circulant dans un échangeur air-sol

La détermination de la température de l'air dans l'échangeur est un problème complexe à résoudre car elle dépend de plusieurs paramètres [Sal06] : la température d'air en sortie, les propriétés thermo-physiques du sol et celles de l'air, le débit d'air et la géométrie de l'échangeur. Ces paramètres caractérisent les transferts de chaleur qui ont lieu entre le sol et l'air circulant dans l'échangeur. À cause de l'amortissement thermique du sol et de la fréquence des excitations thermiques à la surface du sol, les transferts de chaleur dans le sol sont plus lents par rapport à ceux entre le sol et l'air circulant dans l'échangeur. Pour une très petite durée le champ de température du sol est considéré constant. [! A récrire]

Ainsi, les échanges thermiques entre le tube et l'air à l'intérieur de l'échangeur sont calculés par un modèle thermique linéaire transitoire 2D décrivant les phénomènes expliqués précédemment. Le modèle est résolu avec une condition en température à la surface du sol constante pour une durée correspondant à la distance parcourue par l'air pour traverser l'échangeur (0,2 s) comme l'illustre la figure 5.6. Le détails du couplage sol-air est disponible à l'Annexe E, 165 : Principe de la modélisation d'un échangeur air-sol.

Le modèle néglige les pertes de charge et considère un débit d'air constant au cours de la durée de la simulation et le long de l'échangeur.

Propriétés thermo-physiques du sol

Les propriétés thermo-physiques du sol (conductivité thermique, capacité thermique et diffusivité thermique du sol) sont identifiées, voir le tableau 5.1, à partir de plusieurs méthodes : les mesures expérimentales réalisées en laboratoire, les valeurs de la littérature

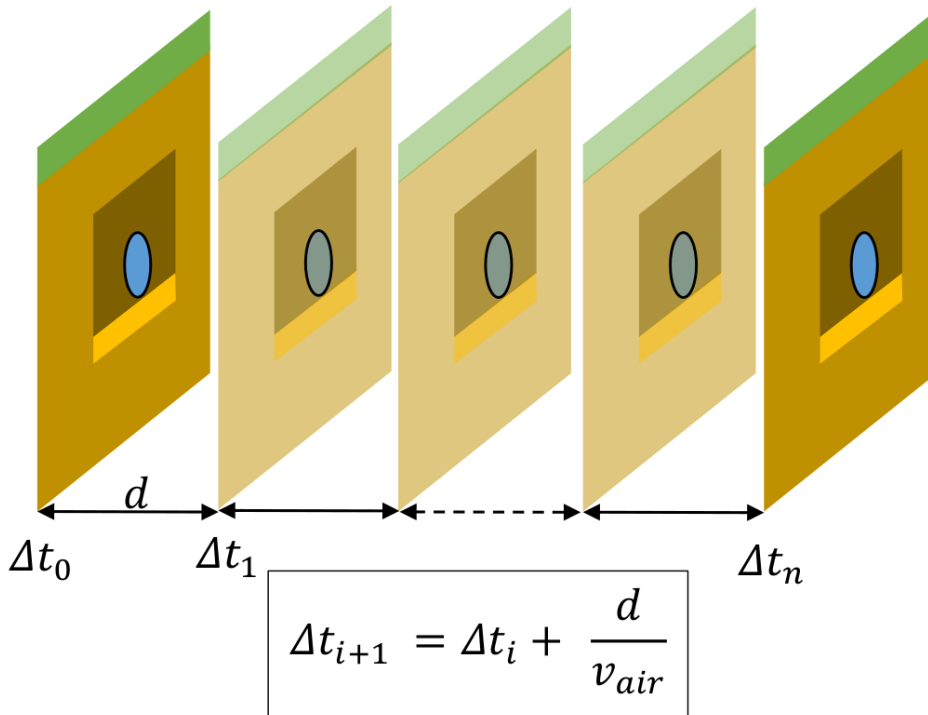


Figure 5.6 – Principe de la méthode pour calculer la température de l'air circulant dans l'échangeur.

et par identification numérique.

Les propriétés thermo-physiques du sable du lit de pose et du mélange sable-bentonite (4 %) sont caractérisées par des mesures expérimentales en laboratoire à partir de la méthode présentée par Nowamooz [Now14] pour l'étude de l'impact de la teneur en eau d'un sol sur ses propriétés thermo-physiques. La même méthode est utilisée pour caractériser les propriétés thermo-physiques du mélange sable-bentonite (4 %) et le sable du lit de pose.

La diffusivité thermique du tube de l'échangeur provient du document technique du fabricant.

Concernant la diffusivité thermique du remblai, elle est obtenue par identification entre le modèle et les mesures en utilisant la méthode de Levenberg-Marquardt, car aucune valeur connue n'est disponible dans la littérature.

Coupe n°	Diffusivité thermique D [$mm^2.s^{-1}$]		
	1	2	3
Terre végétale	0,58 ± 0,06		
Remblai	0,72 ± 0,04		
Enrobage	0,63 ± 0,08	0,67 ± 0,08	0,71 ± 0,07
Lit de pose	0,63 ± 0,08	0,85 ± 0,06	0,74 ± 0,08
Tube	0,28 ± 0,01		

Tableau 5.1 – Valeurs de la diffusivité thermique des différents sols.

Étude de sensibilité

L'influence des paramètres d'entrée sur l'énergie de chauffage/refroidissement est étudiée avec une analyse de sensibilité. Les simulations de l'échangeur air-sol s'effectuent en variant chaque paramètre d'entrée par rapport aux valeurs de référence, voir le tableau 5.2. Les variations relatives sont de -10% , -5% , $+5\%$ et $+10\%$. Ces valeurs correspondent à l'incertitude cumulée maximale des mesures expérimentales et de la variabilité dans le temps. L'étude de sensibilité est réalisée avec la température de l'air extérieur relevée sur la période du mois de janvier et de juillet 2014.

Paramètre	Valeurs	Unité
$\lambda_{enrobage}$	1,14	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$C_{enrobage}$	1,60	$MJ.K^{-1}.kg^{-1}$
$\lambda_{litdepose}$	1,34	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$C_{litdepose}$	1,81	$MJ.K^{-1}.kg^{-1}$
$\lambda_{remblai}$	1,14	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$C_{remblai}$	1,61	$MJ.K^{-1}.kg^{-1}$
λ_{tube}	0,50	$W.m^{-1}.K^{-1}$
C_{tube}	1,76	$MJ.K^{-1}.kg^{-1}$
h_{conv}	10,0	$W.m^{-2}.K^{-1}$
v_{air}	1,60	$m.s^{-1}$
$z_{échangeur}$	1,00	m
L	30,0	m

Tableau 5.2 – Valeurs des paramètres de référence utilisées pour l'étude de sensibilité.

Les résultats de l'étude de sensibilité, figures 5.7 et 5.8, sont représentés par l'énergie de chauffage E_c en janvier et l'énergie de rafraîchissement E_f en juillet dépendamment des valeurs des paramètres. Celles-ci sont rapportées aux valeurs de référence.

Pour les deux cas, la vitesse de l'air et la profondeur d'enfouissement de l'échangeur sont les paramètres les plus sensibles. Les autres paramètres influencent de 2% les résultats du modèle. A partir de ces résultats, un critère doit être respecté pour assurer une précision du modèle inférieure à 5% : les estimations de la longueur et de la vitesse de l'air doivent être inférieures à 5% . Cette remarque est en accord avec le cas présent car l'incertitude sur la longueur de l'échangeur et sur la vitesse de l'air sont plus petites que celle des propriétés thermo-physiques du sol. Comme le montre le tableau 5.3, l'incertitude des résultats numériques est inférieure à 2% si les incertitudes des différents paramètres mesurés sont prises en compte.

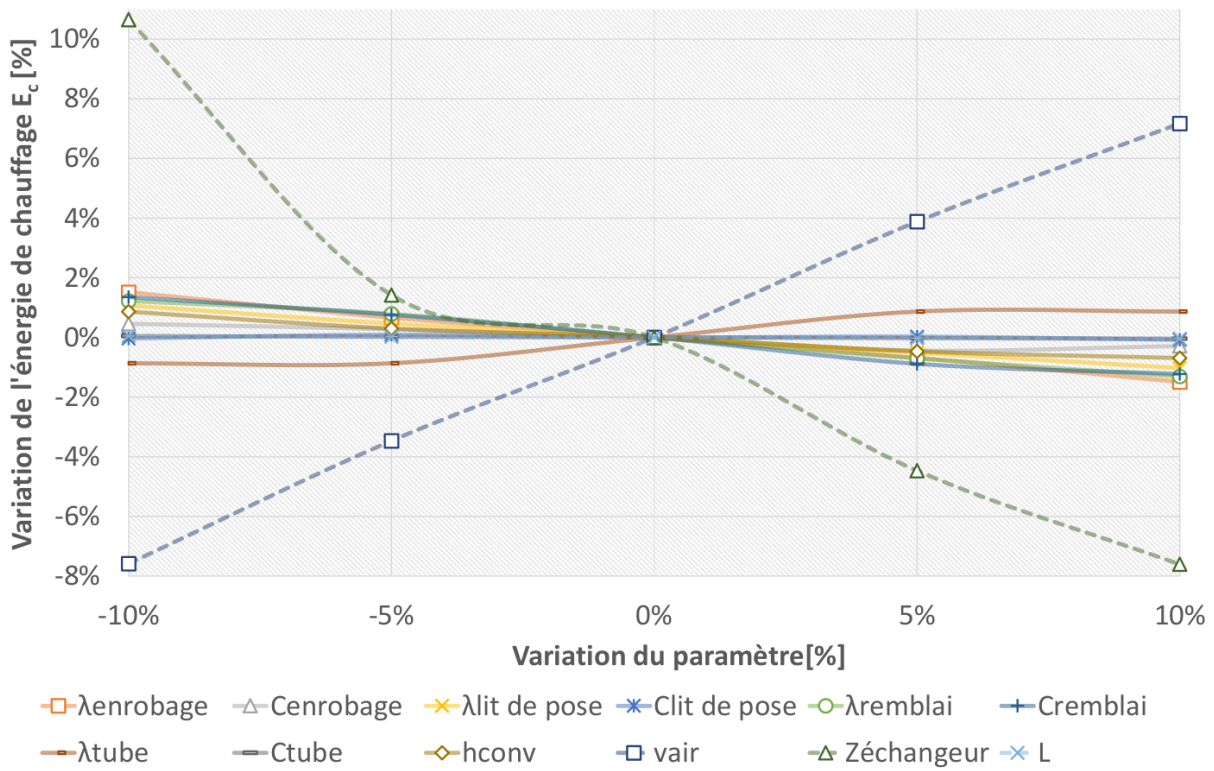


Figure 5.7 – Étude de sensibilité pour la période de janvier.

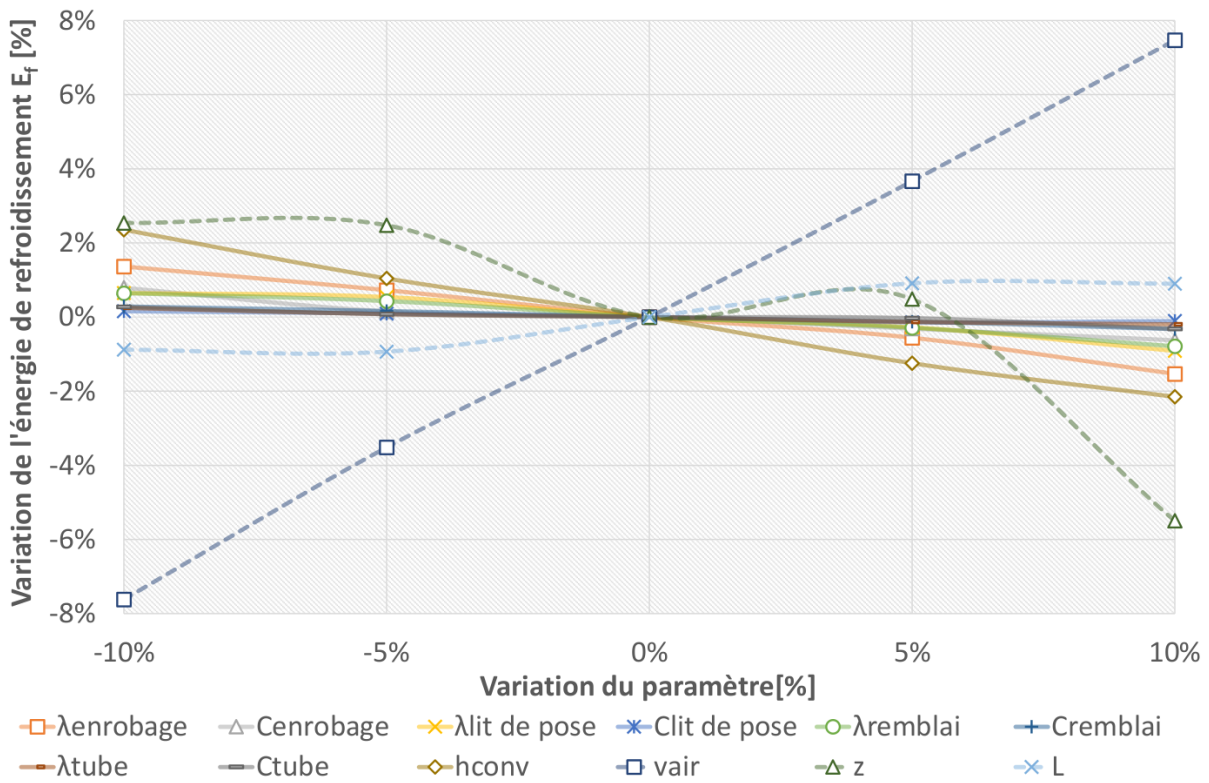


Figure 5.8 – Étude de sensibilité pour la période de juillet.

Paramètre	Incertitude du paramètre [%]	Incertitude du modèle [%]	
		janvier	juillet
$\lambda_{enrobage}$	10	1,8	1,8
$C_{enrobage}$	10	0,5	0,8
$\lambda_{litdepose}$	10	1,7	0,5
$C_{litdepose}$	10	0,2	0,2
$\lambda_{remblai}$	6	0,8	0,6
$C_{remblai}$	10	1,4	0,2
λ_{tube}	4	0,1	0,1
C_{tube}	4	0,2	0,1
h_{conv}	2	0,4	0,4
v_{air}	1,5	1,8	1,8
$z_{échangeur}$	2	2	1
L	0,1	0,1	0,1

Tableau 5.3 – Récapitulatif de l’influence de l’incertitude des paramètres sur l’incertitude du modèle numérique de l’échangeur air-sol.

5.3 Validation expérimentale de la modélisation numérique

La modélisation de l’échangeur air-sol repose sur deux modèles : celui de la température du sol et celui de la température de l’air circulant dans l’échangeur. Une validation de chaque modèle est effectuée avec les données expérimentales de l’échangeur air-sol sur la plateforme géothermique pour l’année 2014 (année où toutes les mesures sont cohérentes et disponibles).

Validation du champ de température du sol

L’échangeur air-sol expérimental dispose de trois coupes verticales instrumentées par des capteurs de température du sol et d’air.

Les résultats de la simulation sont comparés aux capteurs T_0 , T_1 , T_2 , T_3 et T_4 (voir la figure 5.1). La comparaison est représentée sous la forme de deux graphiques : une représentation temporelle (figures 5.9, 5.10 et 5.11) et une autre statistique avec la répartition des différences de température modèle/mesures par intervalle de $0,1\text{ }^\circ\text{C}$ (figures 5.12, 5.13 et 5.14).

Les figures 5.9, 5.10 et 5.11 donnent des informations sur le comportement thermique du modèle. Les variations de température du capteur T_1 montrent que les variations de la température à la surface du sol sont prises en compte par le modèle. Cette remarque s’applique aussi au capteur T_4 . La température du sol proche de l’échangeur (capteur T_4) varie dépendamment avec la variation de la température circulant dans l’échangeur. La température du sol est amortie avec la profondeur. Le rôle du sol comme **amortisseur thermique** est bien reproduit par le modèle.

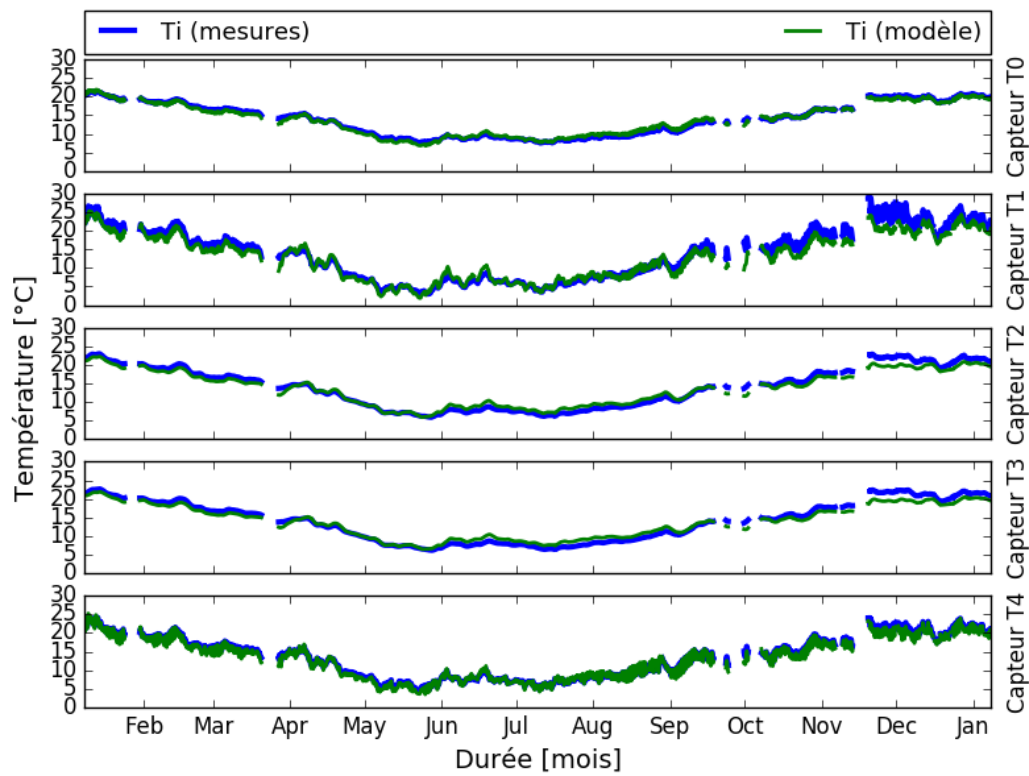


Figure 5.9 – Représentation graphique de la température mesurée (en bleu) et prédite par le modèle (en vert) pour les capteurs T_0 , T_1 , T_2 , T_3 et T_4 de la coupe n°1 (sable).

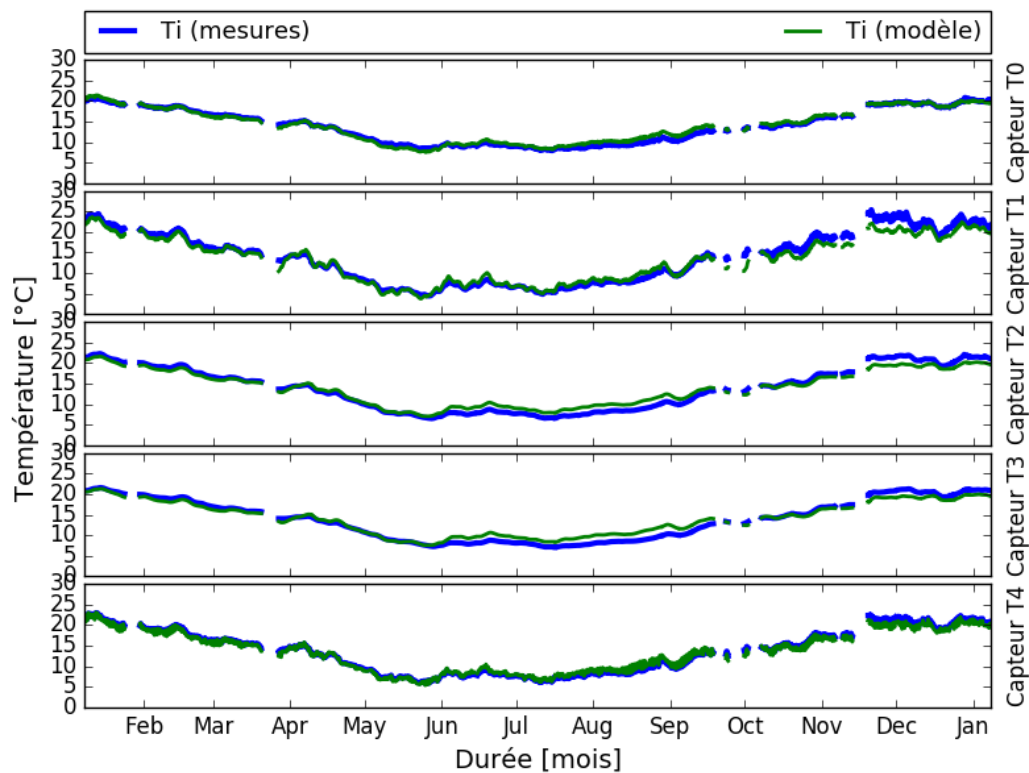


Figure 5.10 – Représentation graphique de la température mesurée (en bleu) et prédite par le modèle (en vert) pour les capteurs T_0 , T_1 , T_2 , T_3 et T_4 de la coupe n°2 (sable-bentonite).

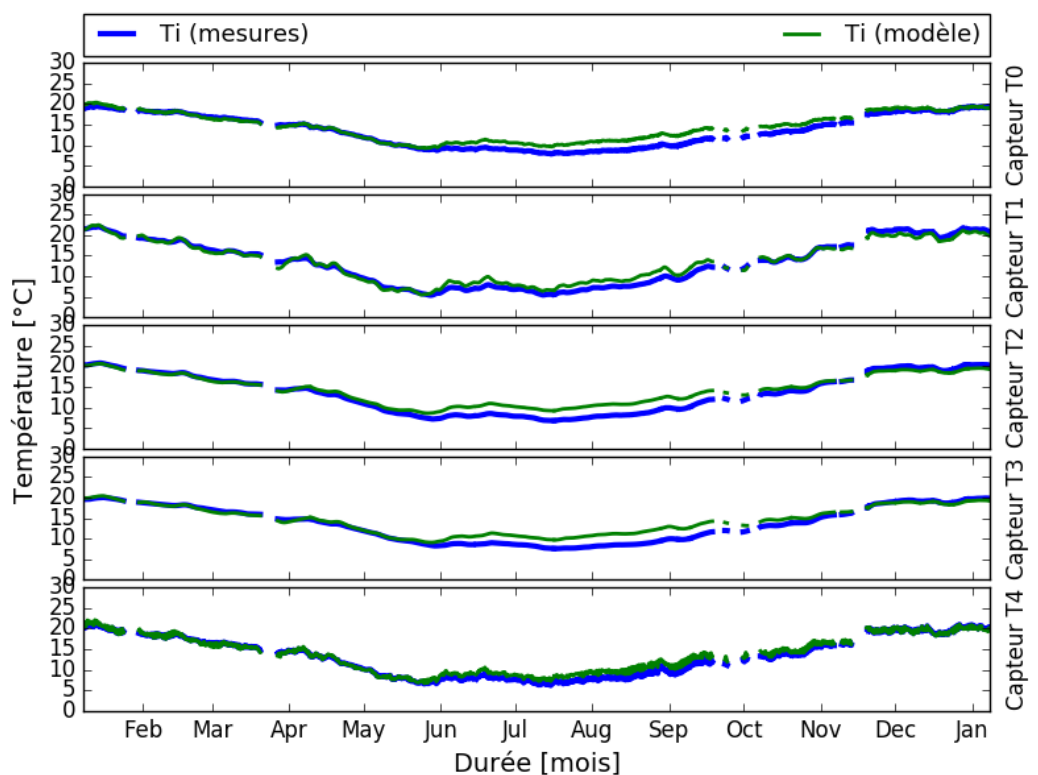


Figure 5.11 – Représentation graphique de la température mesurée (en bleu) et prédite par le modèle (en vert) pour les capteurs T_0 , T_1 , T_2 , T_3 et T_4 de la coupe n°3 (remblai in-situ).

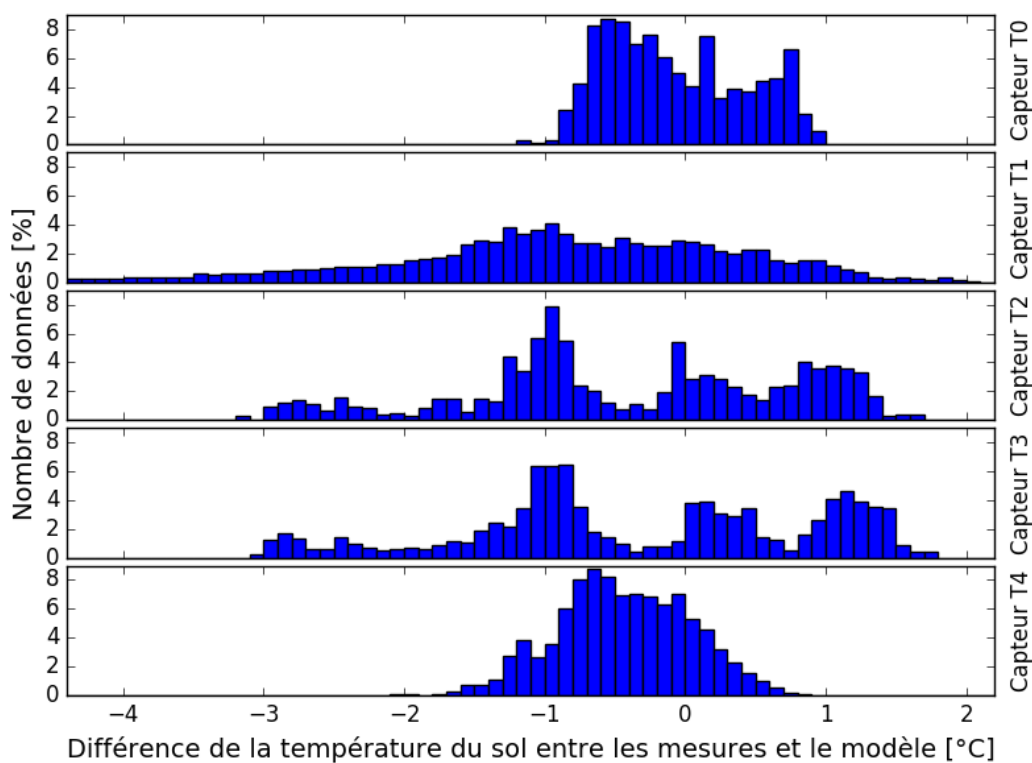


Figure 5.12 – Répartition statistique de la différence de température entre les mesures et le modèle pour la coupe n°1.

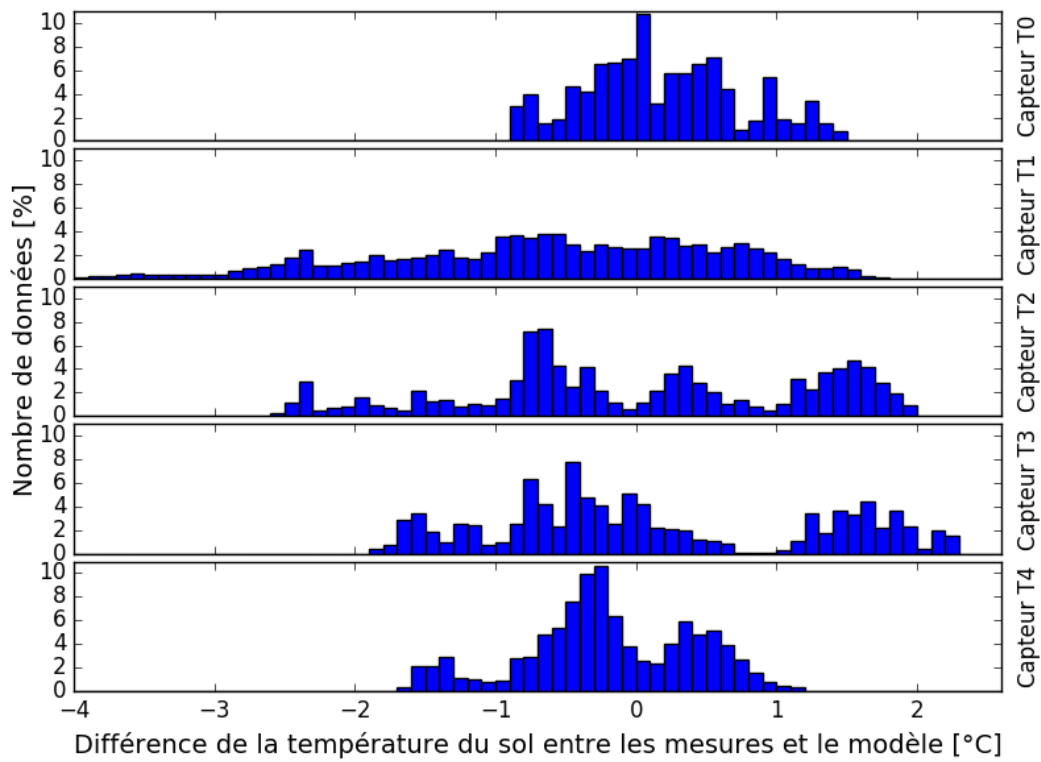


Figure 5.13 – Répartition statistique de la différence de température entre les mesures et le modèle pour la coupe n°2.

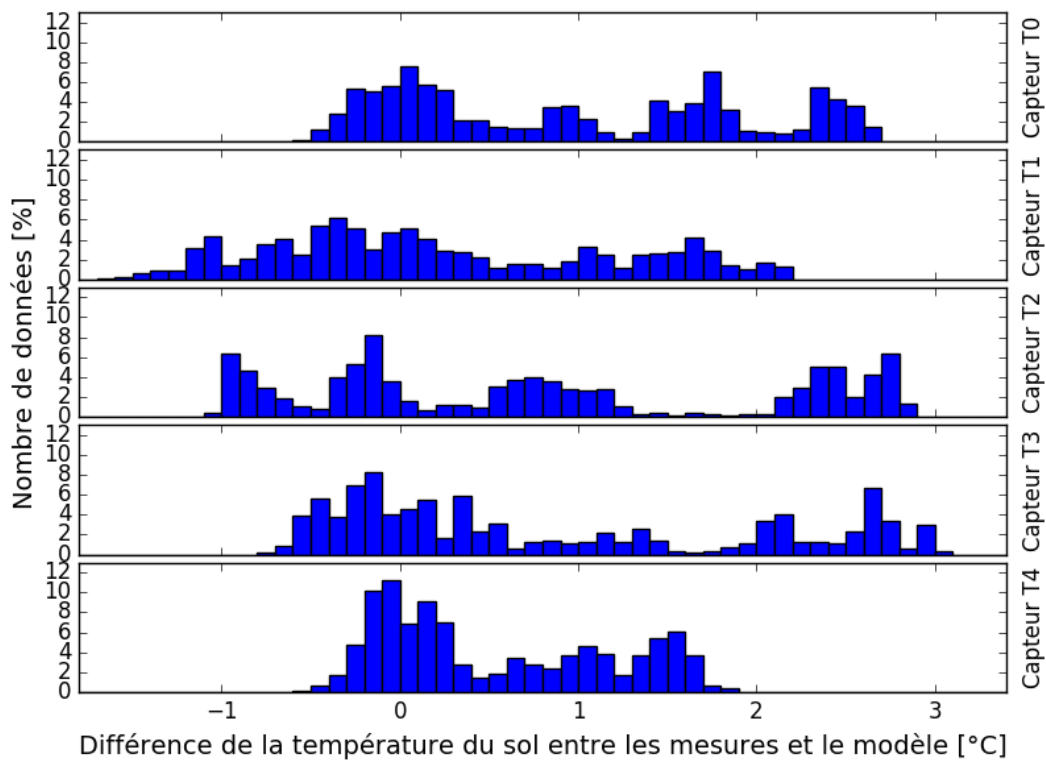


Figure 5.14 – Répartition statistique de la différence de température entre les mesures et le modèle pour la coupe n°3.

Les figures 5.12, 5.13 et 5.14 quantifient le comportement thermique du modèle par rapport aux mesures. L'écart maximum mesures/modèle du capteur T_1 est de l'ordre de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cette différence peut être expliquée par une mauvaise évaluation soit de la température de surface soit des propriétés thermo-physiques de la terre végétale. La forme de l'écart mesures/modèles des capteurs T_2 et T_3 sont semblables avec un écart maximum de $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Concernant les capteurs T_0 et T_4 , l'écart maximum est moins important avec une étendue de $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. La prédiction de la température du sol au niveau du capteur T_4 est plus faible que celle mesurée ce qui risque de sous-estimer les échanges convectifs entre le sol et l'air circulant dans l'échangeur.

En résumé, la différence de température entre le modèle et les mesures est de l'ordre de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ mais cette différence diminue en s'approchant de l'échangeur ce qui permettra de modéliser *correctement les échanges thermiques entre l'air circulant dans l'échangeur et le sol*.

Validation de la température de l'air circulant dans l'échangeur air-sol

La température de l'air circulant dans l'échangeur est mesurée à cinq emplacements sur l'échangeur expérimental de la plateforme géothermique : en entrée, à la coupe n°1, 2, 3 et en sortie.

Afin de valider le modèle avec les mesures expérimentales et de vérifier la température de l'air aux cinq points de mesures, l'échangeur air-sol est découpé en six tronçons permettant ainsi de prendre en compte les différents sols d'enrobage, voir le schéma de la figure 5.15. Le modèle est simulé pour chaque longueur en imposant la température d'air in-situ en entrée pour les périodes de janvier 2014 et juillet 2014.

La température de l'air obtenue par le modèle et les mesures sont comparées par deux représentations graphiques : un graphique temporel illustre l'évolution dans le temps de la température de l'air (voir figures 5.16 et 5.17) et un second graphique représente une répartition statistique de l'écart de température entre le modèle et les mesures par pas de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (voir les figures 5.18 et 5.18).

Les figures 5.16 et 5.17 montrent la similarité des écarts entre le modèle et les mesures. Un écart de température est visible. Cet écart augmente à partir de la coupe n°2. L'écart maximum entre le modèle et les mesures est de $1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en janvier et de $3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en juillet. L'écart mesures/modèle est supérieure en juillet qu'en janvier à cause de l'amplitude de température qui est plus importante en juillet. Une grande amplitude accroît donc les écarts mesures/modèle. Le modèle prédit une température de l'air plus importante en juillet et moins importante en janvier que celle mesurée. Cette différence peut s'expliquer par une *sous-estimation de l'échange convectif* entre l'air dans l'échangeur et le sol.

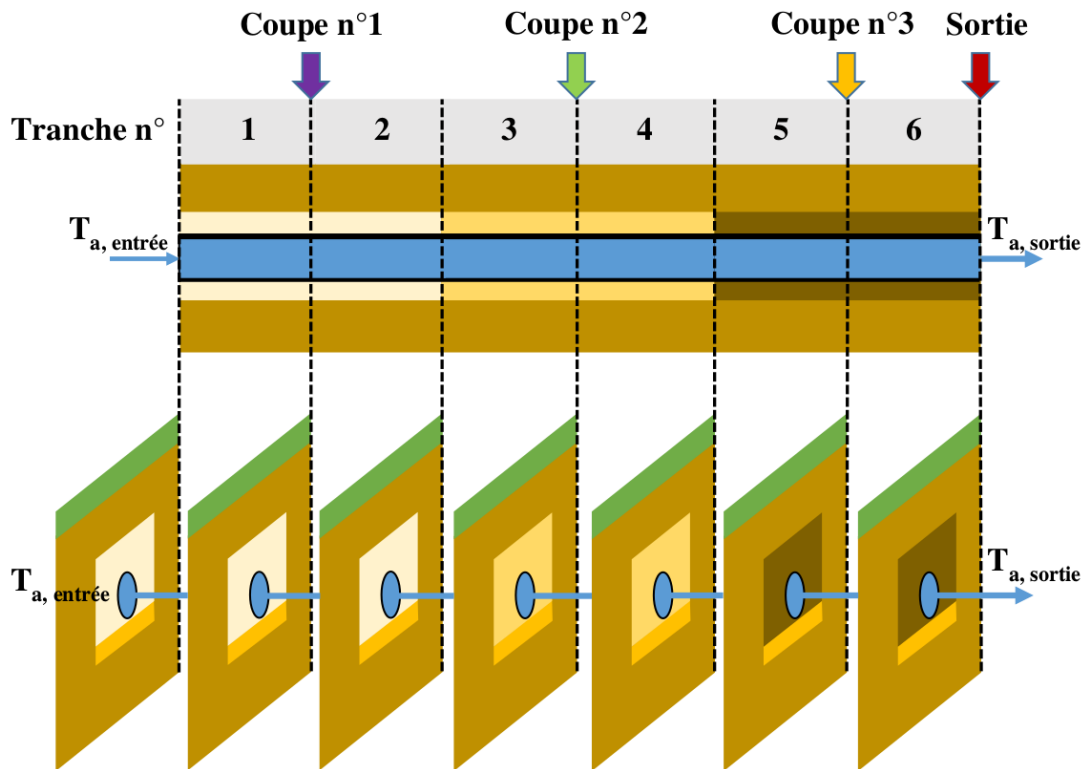


Figure 5.15 – Modélisation de l'échangeur air-sol expérimental.

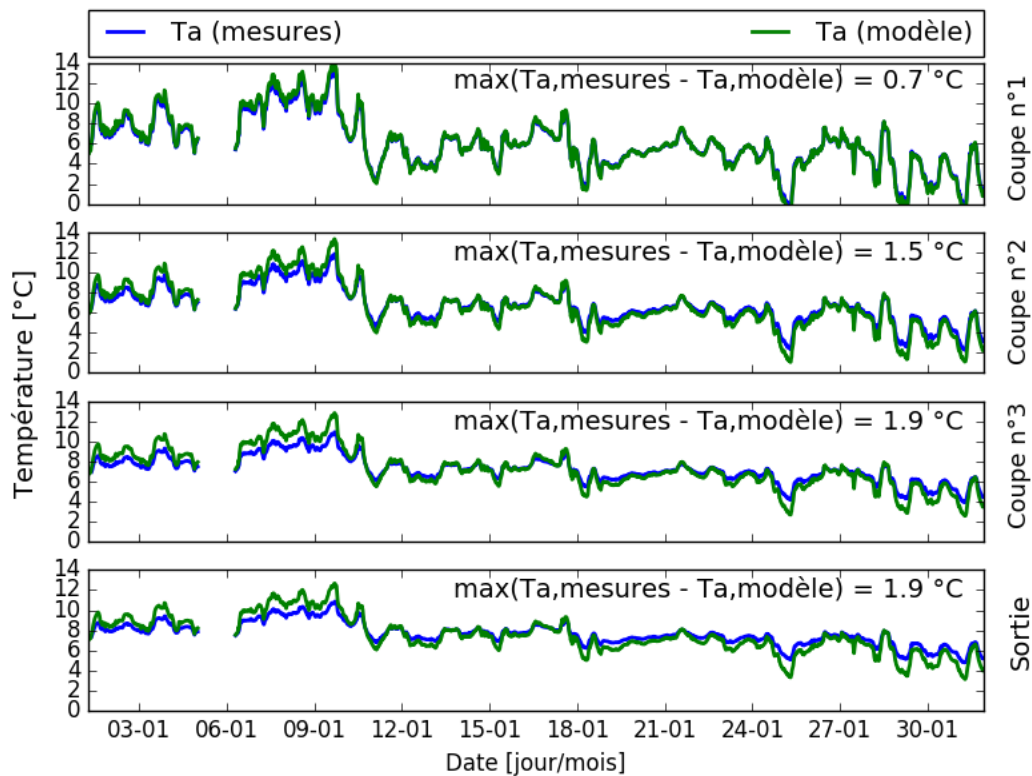


Figure 5.16 – Évolution de la température de l'air mesurée T_a (mesures) et prédite par le modèle T_a (modèle) pour le mois de janvier.

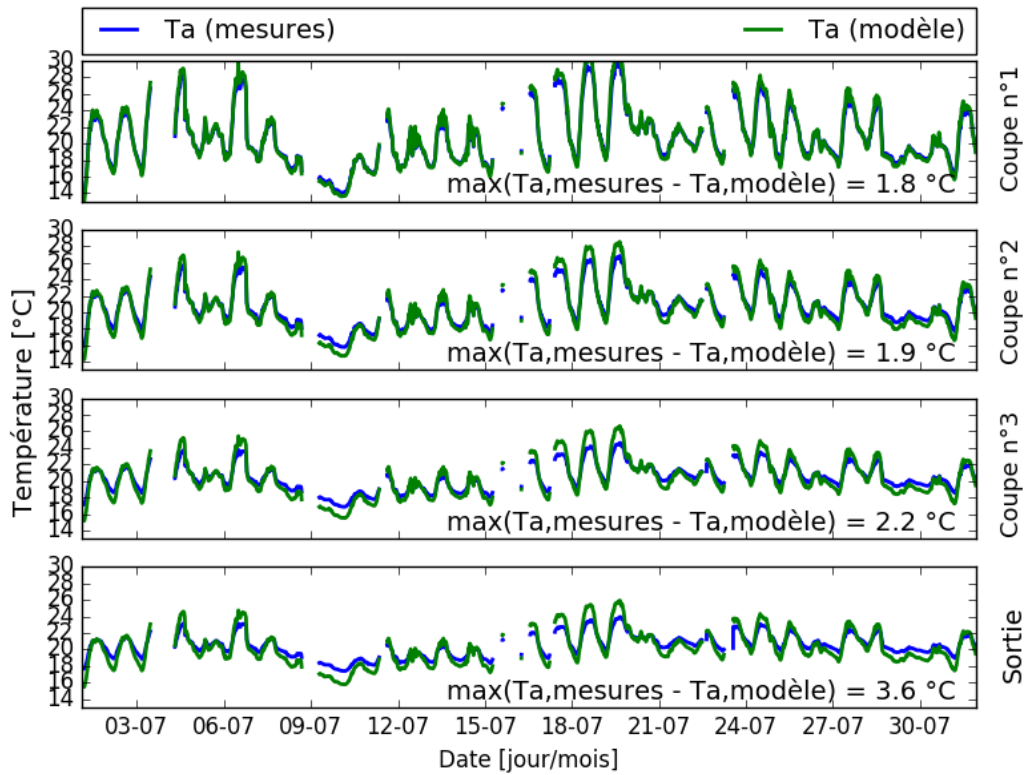


Figure 5.17 – Évolution de la température de l'air mesurée T_a (*mesures*) et prédite par le modèle T_a (*modèle*) pour le mois de juillet.

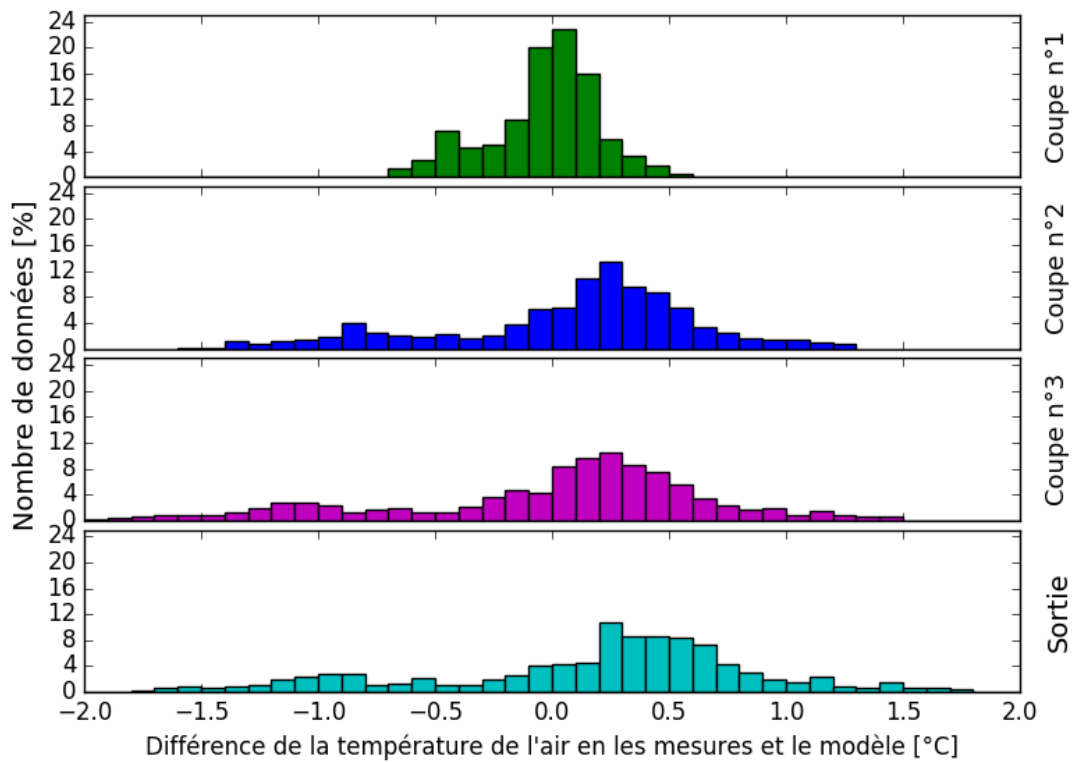


Figure 5.18 – Répartition statistique de l'écart de température de l'air entre le modèle et les mesures pour le mois de janvier.

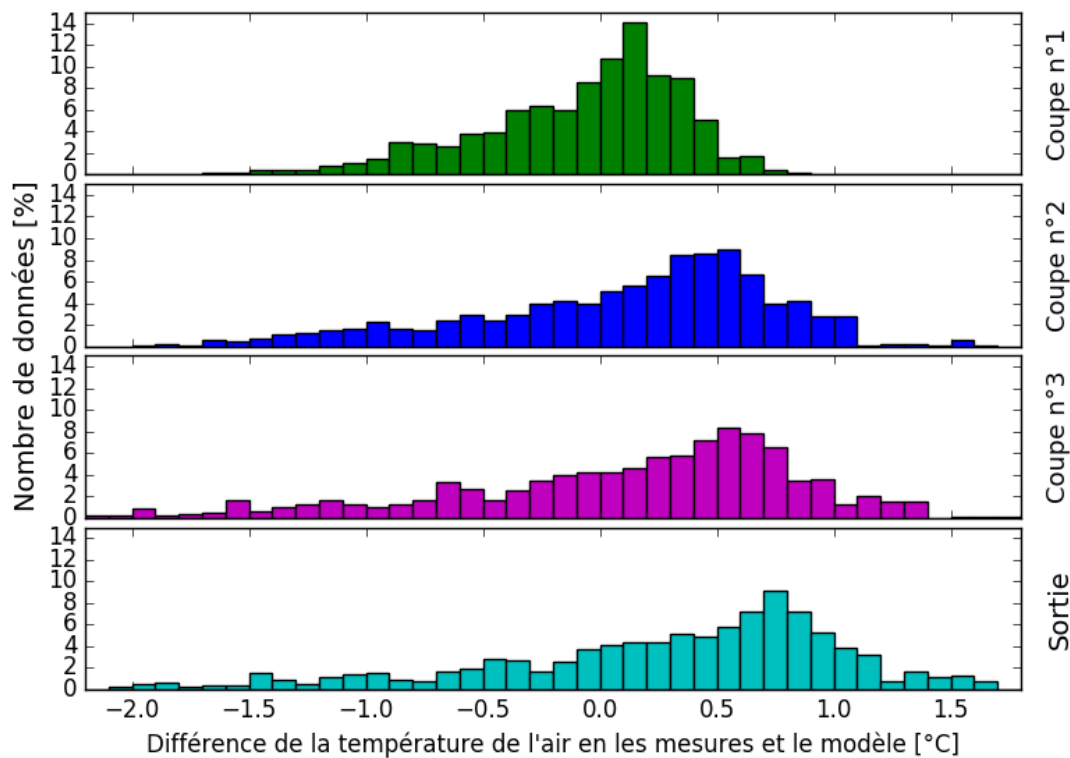


Figure 5.19 – Répartition statistique de l'écart de température de l'air entre le modèle et les mesures pour le mois de juillet.

La représentation statistique (voir les figures 5.18 et 5.19) quantifie les erreurs du modèle. Les écarts de températures entre le modèle et les mesures augmentent avec la distance parcourue par l'air avec un écart maximum de 4 °C pour les deux mois simulés. Ces écarts sont centrés en 0 °C à la coupe n°1 mais ils se décalent du centre jusqu'à 1 °C à la sortie de l'échangeur.

Conclusion

Le champ de température du sol et la température de l'air circulant dans l'échangeur prédits par le modèle sont comparées à celles des mesures expérimentales. Cette comparaison met en évidence une bonne estimation du champ de température du sol à proximité de l'échangeur avec un écart maximum de $1,5\text{ °C}$. Par contre, les échanges thermiques proches de la surface du sol ne sont pas assez détaillés par le modèle pour obtenir une prédiction fine. L'écart maximum mesures/modèle peut atteindre jusqu'à $4,0\text{ °C}$.

Concernant la température de l'air en sortie de l'échangeur, elle est prédite par le modèle avec un écart par rapport aux mesures augmentant avec la longueur de l'échangeur pour atteindre au maximum de $3,6\text{ °C}$. Cet écart peut être expliqué par le cumul de la sous-estimation de l'échange convectif entre le sol et l'air circulant dans l'échangeur et de la sous-estimation de la température du sol à proximité de l'échangeur.

Ces deux comparaisons *valident le modèle thermique*.

5.4 Étude des performances énergétiques d'un échangeur air-sol sous l'influence de différentes conditions climatiques et géologiques

A partir de la modélisation présentée précédemment, deux études numériques sont menées pour approfondir les connaissances sur l'impact des conditions climatiques et géologiques sur les performances énergétiques d'un échangeur air-sol. Dans la première étude, différents types et humidités de sols autour de l'échangeur sont simulés et dans la seconde étude différentes conditions pluviométriques sont simulées.

5.4.1 Étude de l'influence du type et de l'humidité d'un sol

L'impact du type et de l'humidité du sol autour de l'échangeur air-sol sur les performances énergétiques de ce dernier sont étudiés avec la simulation de six configurations différentes pour les périodes du mois de janvier 2014 et juillet 2014. Chaque configuration possède la même géométrie que celle de l'échangeur expérimental mais enfoui à une profondeur de 75 cm, avec une longueur de 30 m et une vitesse d'air constante de $4,0 \text{ m.s}^{-1}$.

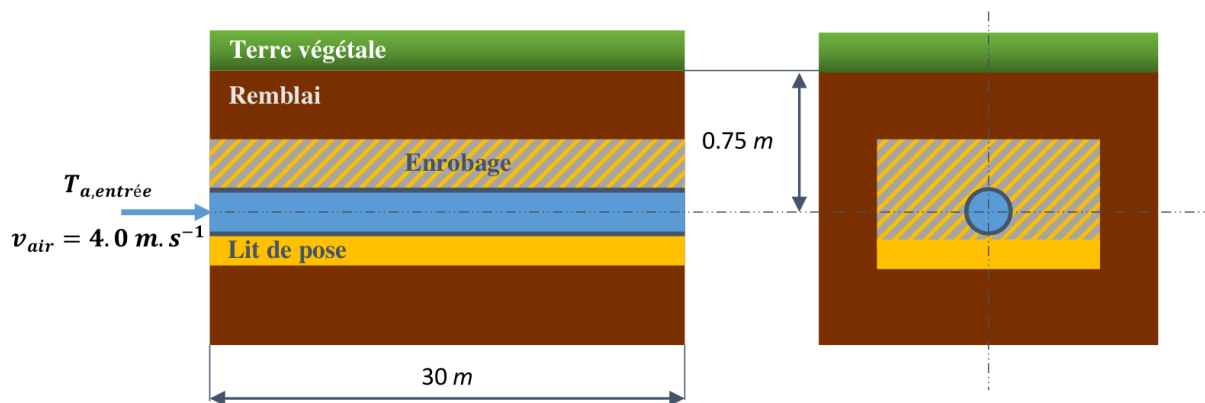


Figure 5.20 – Caractéristiques de l'échangeur air-sol.

Propriétés thermo-physiques du sol d'enrobage

Trois différents types de sol sont utilisés pour la simulation numérique. Ils sont identiques à ceux présent sur l'échangeur air-sol expérimental : du sable, un mélange sable + bentonite (4 %) et du remblai in-situ. Leurs humidités de sol sont équivalentes aux valeurs minimales et maximales des mesures d'humidité du sol de l'échangeur expérimental pendant l'année 2014, voir la figure 5.21.

Leurs propriétés thermo-physiques, voir le tableau 5.4, sont déterminées par interpolation linéaire à partir des mesures des propriétés réalisées en laboratoire en fonction

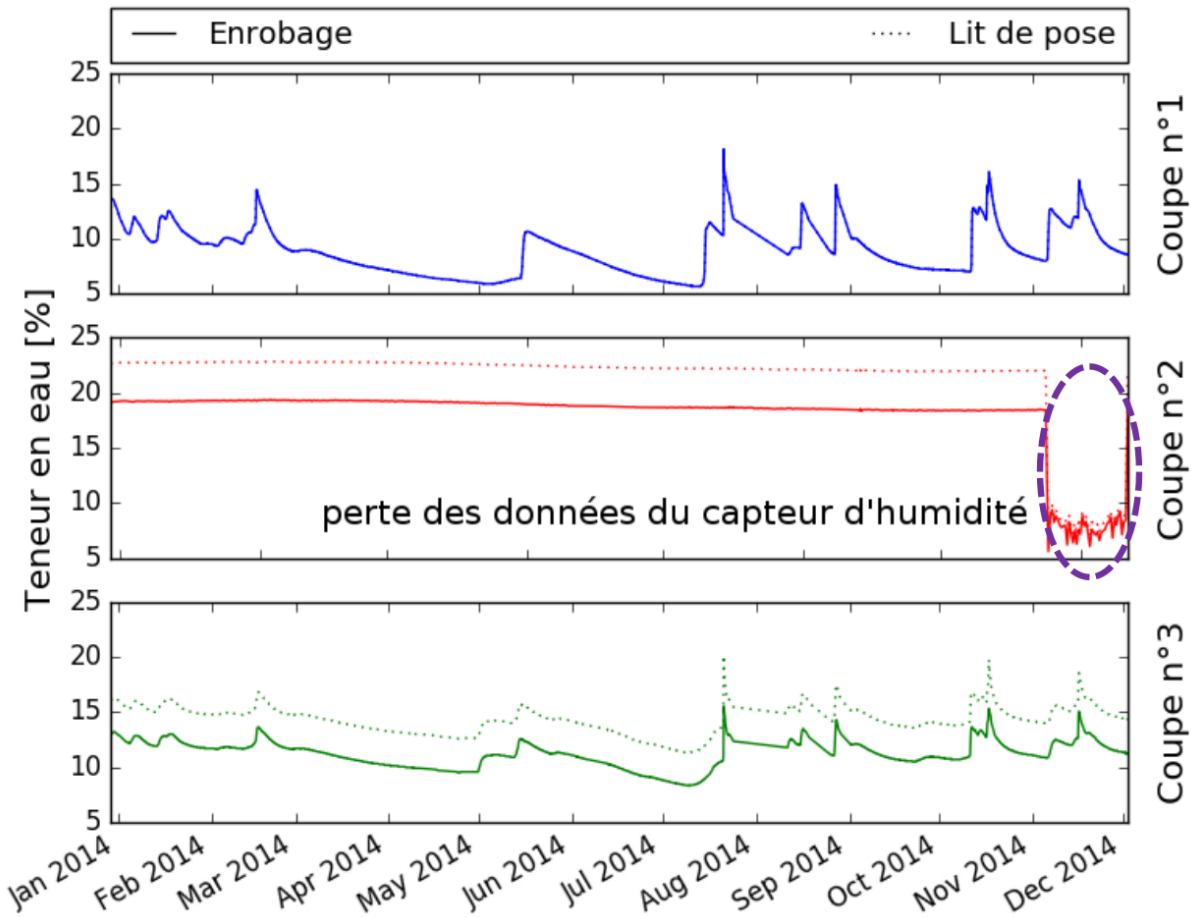


Figure 5.21 – Évolution de la teneur en eau des sols d'enrobage de l'échangeur air-sol expérimental.

de l'humidité du sol. Un point intéressant est la capacité du mélange sable-bentonite à stocker l'eau et à garder une humidité en eau élevée.

Comparaison des performances énergétiques de l'échangeur air-sol

L'énergie échangée entre le sol et l'air circulant dans l'échangeur est estimée par la relation 5.1.

$$E = \int \phi(t) \cdot dt \quad (5.1)$$

Où $\phi(t)$ est le flux de chaleur échangé à chaque instant t qui est défini par la relation 5.2.

$$\phi(t) = v_{air} \cdot \pi \cdot r_{int}^2 \cdot c_{air} \times [T_{a,sortie}(t) - T_{a,entrée}(t)] \quad (5.2)$$

Où v_{air} représente la vitesse de l'air, r_{int} est le rayon intérieur du tube de l'échangeur, c_{air} est la capacité thermique de l'air, $T_{a,sortie}$ est la température de l'air en sortie et $T_{a,entrée}$ est la température d'air en entrée de l'échangeur. Si l'énergie échangée E est > 0

5.4. Étude des performances énergétiques d'un échangeur air-sol sous l'influence de différentes conditions climatiques et géologiques

Type de sol	Humidité	ω_{sol} [kg.kg ⁻¹]	λ_{sol} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	C_{sol} [MJ.K ⁻¹ .m ⁻³]	D_{sol} [mm ² .s ⁻¹]
Sable fin	min.	5,63	0,80	1,44	0,56
	max.	17,0	1,49	1,84	0,81
Sable + Bentonite	min.	18,4	1,38	2,05	0,67
	max.	19,5	1,43	2,11	0,68
Remblai in-situ	min.	8,4	0,95	1,36	0,7
	max.	16,6	1,45	1,68	0,86

Tableau 5.4 – Propriétés thermo-physiques du sol d'enrobage pour différentes configurations.

(respectivement $E < 0$) alors l'énergie est nommée comme une "énergie de chauffe" E_c (respectivement "énergie de rafraîchissement" E_f). En janvier 2014 seulement l'énergie de chauffe est évaluée et en juillet 2014 c'est l'énergie de rafraîchissement. Les résultats de la simulation sont résumés dans les tableaux 5.5 et 5.6.

Type de sol	ω_{min} [kW.h]	ω_{max} [kW.h]	Écart [%]
Sable fin	60,5	71,9	15,9
Sable + Bentonite	73,2	74,04	1,2
Remblai in-situ	65,3	72,7	10,2
Écart maximum [%]	17,4	2,9	

Tableau 5.5 – Énergie de chauffe pour le mois de janvier 2014.

Type de sol	ω_{min} [kW.h]	ω_{max} [kW.h]	Écart [%]
Sable fin	46,9	54,2	13,6
Sable + Bentonite	54,8	55,3	0,8
Remblai in-situ	49,3	54,2	9,1
Écart maximum [%]	14,6	1,9	

Tableau 5.6 – Énergie de rafraîchissement pour le mois de juillet 2014.

Les résultats peuvent être interprétés en analysant les tableaux 5.5 et 5.6 soit par colonnes soit par lignes.

Une analyse par colonnes permet d'interpréter l'influence de l'humidité du sol pour un même type de sol sur l'énergie de chauffe et de rafraîchissement. Pour les deux périodes, l'humidité du sol influence l'énergie échangée. Pour l'enrobage composé de sable, les écarts d'humidité impliquent des variations d'énergie de 15,9 % en janvier et de 13,6 % en juillet. Dans le cas du remblai in-situ, les écarts sont de 10,2 % en janvier et de 9,1 % en juillet. Concernant le mélange sable + bentonite, ces écarts sont moins élevés avec 1,2 % en

janvier et 0,8 % en juillet. Les *écarts relatifs d'énergies* sont du *même ordre* en janvier et en juillet mais l'*énergie absolue* est plus *importante* pour le mois de janvier.

Avec une analyse des résultats par lignes, on remarque que le type de sol influence l'énergie de chauffe ou de rafraîchissement. Dans le cas où l'humidité du sol est minimale, le type de sol pour l'enrobage influence l'énergie de chauffe de 17,4 % et l'énergie de rafraîchissement de 14,6 %. Ces écarts sont minimales (2,9 % pour E_c et 1,9 % pour E_f) lorsque le sol est à son humidité maximale. Le *type de sol d'enrobage* influence les performances énergétiques seulement si *l'humidité de celui-ci est faible*.

Conclusion

Cette étude numérique met en évidence *l'influence à long terme du type et de l'humidité du sol d'enrobage sur les performances énergétiques d'un échangeur air-sol*. D'une part, l'humidité du sol d'enrobage joue un rôle majeur : en étant à une humidité maximale, les performances énergétiques sont meilleures indépendamment du type de sol et de l'écart d'énergie échangée par rapport à un sol d'humidité minimale peut atteindre 15,9 %. D'autre part, le choix d'un sol d'enrobage tel qu'un *mélange de sable et de bentonite* peut garantir une grande performance énergétique de l'échangeur en gardant une teneur en eau élevée et stable.

5.4.2 Étude de l'influence d'un événement pluvieux

Une étude numérique est menée sur l'impact d'un événement pluvieux sur les performances énergétiques d'un échangeur air-sol. Les objectifs de cette étude sont de **quantifier l'énergie échangée** entre l'échangeur et le sol lors d'une précipitation de pluie et d'étudier l'influence des **conditions pluviométriques** en intensité et en durée sur cette énergie.

Pour s'approcher au mieux des conditions réelles de précipitations in-situ, les conditions pluviométriques simulées en laboratoire dans le chapitre 3 avec un sol multicouche (voir partie 3.4.2) sont retenues avec l'ajout deux cas extrêmes : un scénario sans pluie qui servira de référence et un scénario avec une pluie de $5,0 \text{ mm.h}^{-1}$ sur une durée de 10 h. Un récapitulatif des différents scénarios est présenté dans le tableau 5.7.

Cas n°	Essai n°	Type de pluie	Intensité moyenne	Durée
a		aucune pluie		
b	2	pluie faible	2,5 mm.h ⁻¹	1 h 10 min
c	4	pluie faible	2,5 mm.h ⁻¹	2 h 50 min
d	5	pluie modérée	5,0 mm.h ⁻¹	35 min
e	7	pluie modérée	5,0 mm.h ⁻¹	1 h 35 min
f		pluie modérée	5,0 mm.h ⁻¹	10 h

Tableau 5.7 – Récapitulatif des différents scénarios de précipitations de pluie.

Les résultats lors de ces essais ont permis d'obtenir l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps à une certaine profondeur. À partir de ces données et de la caractérisation des propriétés thermo-physiques du sable en fonction de la teneur en eau en laboratoire (voir tableau 5.8), les valeurs des propriétés thermo-physiques du sol d'enrobage et du lit de pose sont déterminées par interpolation linéaire.

Teneur en eau ω [kg.kg ⁻¹]	Conductivité thermique λ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	Capacité thermique volumique C [MJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
0,0 ± 0,5	0,22 ± 0,02	1,21 ± 0,4
10,0 ± 0,5	1,04 ± 0,04	1,63 ± 0,5
20,0 ± 0,5	1,44 ± 0,06	2,13 ± 0,6
30,0 ± 0,5	1,72 ± 0,06	2,64 ± 0,6

Tableau 5.8 – Propriétés thermo-physiques du sable mesurées en laboratoire.

La configuration de l'échangeur air-sol simulée est *identique* à celle de l'étude précédente : une profondeur d'enfouissement de 75 cm, une longueur de 30 m et une vitesse d'air constante de 4,0 m.s⁻¹. Les autres paramètres tels que le rayon de l'échangeur, l'épaisseur du tube, la géométrie du lit de pose et la géométrie du sol d'enrobage sont *identiques* à ceux de l'échangeur air-sol expérimental (voir partie 1.3.2).

La simulation effectuée correspond à 24 h sans pluie suivie des conditions des essais réalisées en laboratoire au chapitre 3 de 48 h soit une durée totale de 72h. La simulation est réalisée en appliquant la température de l'air relevée in-situ pour les trois premiers jours du mois de janvier 2014 et de juillet 2014.

Température de l'air en sortie de l'échangeur

Une première analyse des résultats concerne l'évolution de la température de l'air en sortie de l'échangeur, voir les figures 5.22 et 5.23. Celle-ci est identique sur les 24 premières heures ce qui est logique car les propriétés thermo-physiques du sol sont identiques pour cette période. Par contre, lors du début de l'événement pluvieux, une différence de température est observable. Cette différence est plus importante pour le mois de juillet que pour le mois de janvier. Dans les deux cas, on remarque une *variation de la température d'air en sortie d'échangeur*.

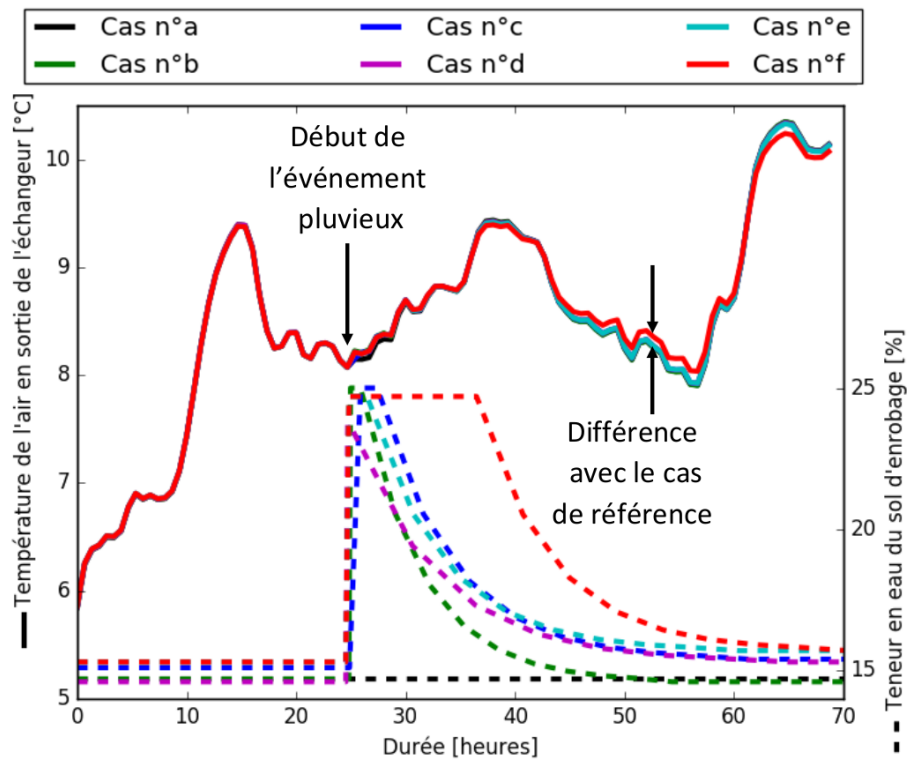


Figure 5.22 – Température de l'air en sortie de l'échangeur air-sol pour différentes conditions de précipitation pour le mois de janvier 2014.

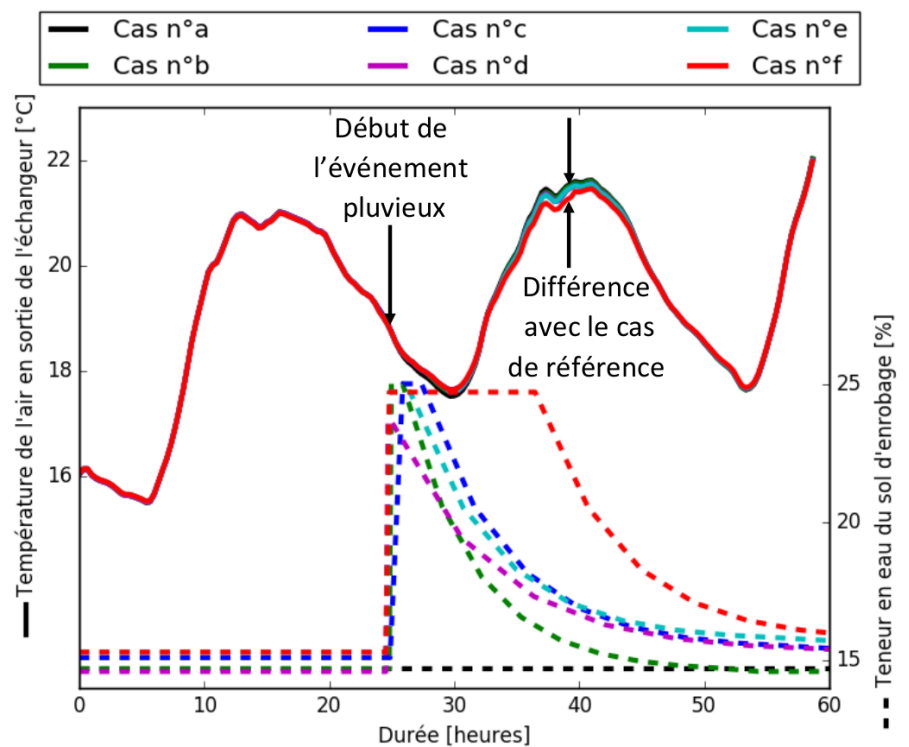


Figure 5.23 – Température de l'air en sortie de l'échangeur air-sol pour différentes conditions de précipitation pour le mois de juillet 2014.

Les écarts de températures étant trop petits pour interpréter l'influence des conditions météorologiques, une analyse de la puissance échangée entre le sol et l'air est menée par la suite.

Puissance échangée entre l'échangeur et le sol

Une deuxième analyse concerne la puissance échangée entre l'échangeur et le sol. Cette puissance est déterminée par le même calcul que l'étude précédente (équation 5.2). Afin d'interpréter les différentes conditions météorologiques sur l'énergie échangée, la *puissance différentielle* $\phi_{diff}(t)$ est définie comme étant la puissance échangée soustraite à celle du cas référent (échangeur soumis à aucune pluie).

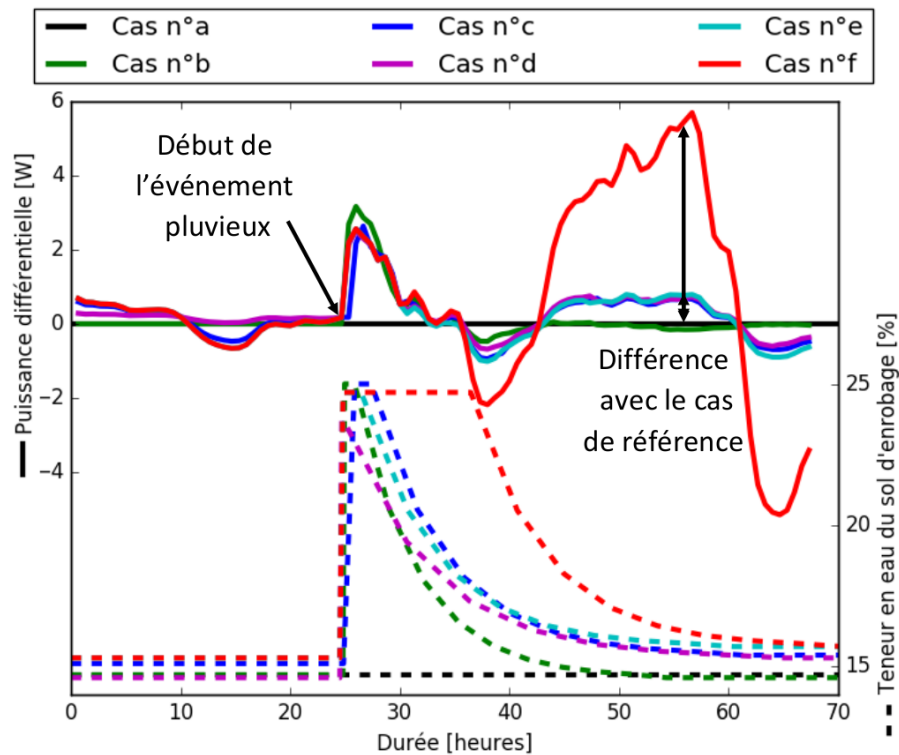


Figure 5.24 – Évolution de la puissance différentielle et de la teneur en eau du sol d'enrobage pour le mois de janvier 2014.

Les figures 5.24 et 5.25 illustrent l'évolution de la *puissance différentielle* $\phi_{diff}(t)$ entre le cas référent et les autres conditions pluviométriques. Les écarts de puissances varient à partir de 24 heures. Au début de l'événement pluvieux, le sol se sature en eau et la puissance différentielle est identique (de l'ordre de 2 W) indépendamment de l'intensité et de la durée de la pluie. Par contre, à partir de 1,5 jours, la teneur en eau diminue et les écarts entre chaque cas sont plus importants. L'intensité de la pluie ne joue pas un rôle important car la puissance différentielle est sensiblement identique aux pluies inférieures à 3 heures (cas b, c, d et e). Par contre, le cas f avec une durée de pluie de 10 heures et un écart de l'ordre de 4 W montre l'impact positif de l'humidification du sol sur la puissance échangée par l'échangeur.

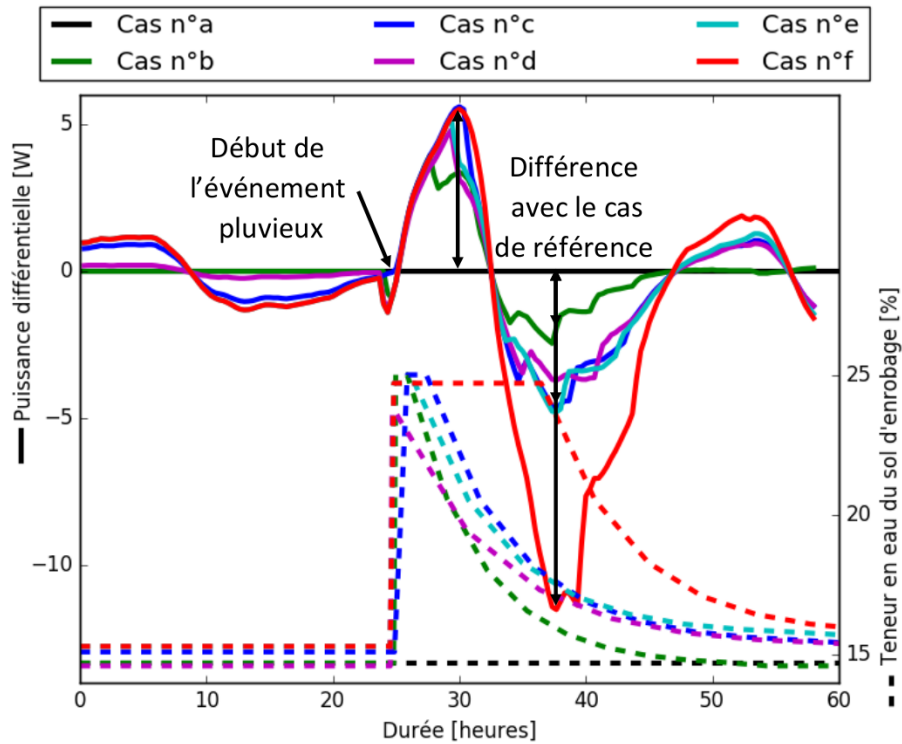


Figure 5.25 – Évolution de la puissance différentielle et de la teneur en eau du sol d'enrobage pour le mois de juillet 2014.

Énergie totale échangée

L'analyse de la puissance différentielle met en évidence l'influence de la durée de la pluie sur les performances énergétiques d'un échangeur air-sol mais il est intéressant de connaître quel est le bénéfice de l'énergie échangée sur la période de l'événement pluvieux. C'est pourquoi l'énergie totale échangée est calculée à partir de l'équation 5.1. En janvier, seulement l'énergie de chauffe E_c est calculée et en juillet, c'est l'énergie de rafraîchissement E_f . Les résultats sont récapitulés dans le tableau 5.9

Période	Cas n°	a	b	c	d	e	f	
janvier 2014	E_c	[kWh]	1,96	1,94	1,98	1,98	1,98	2,03
		[%]	0,0	0,6	0,9	1,0	0,9	3,6
juillet 2014	E_f	[kWh]	1,65	1,660	1,68	1,68	1,68	1,73
		[%]	0,0	0,9	2,2	2,0	2,2	5,2

Tableau 5.9 – Énergie échangée entre le sol et l'air.

Les écarts d'énergie lors d'un événement pluvieux de 48 heures sont en valeurs absolues de l'ordre de 70 Wh en janvier et de 80 Wh en juillet. Les pluies d'une durée de moins de 3 heures influencent peu l'énergie échangée (< 1 % en janvier et < 2,2 % en juillet). Par contre, le cas f, l'influence de la pluie est plus importante (3,6 % en janvier et 5,2 % en juillet). Par conséquent, l'humidification du sol sur une période supérieure à

10 heures améliore sensiblement les performances énergétiques d'un échangeur air-sol. Il faut noter qu'en raison de la durée de simulation très courte, l'influence d'un événement pluvieux dépend des conditions climatiques. Avec des conditions climatiques favorables, par exemple avec une importante variation de la température journalière, l'influence d'un événement pluvieux sera plus importante.

Conclusion

Cette étude numérique met en évidence l'influence d'un événement pluvieux sur les performances énergétiques d'un échangeur air-sol à court terme. Ceux-ci sont impactés de manière plus importantes par la durée de la pluie que par son intensité. Les écarts de puissance peuvent atteindre plus de 5 % pour une durée de 48 heures. Il est également intéressant de noter que cet écart varie selon les conditions climatiques. D'après cette étude numérique, nous prouvons *l'impact significatif des conditions météorologiques sur les performances énergétiques d'un échangeur air-sol.*

5.5 Bilan du chapitre

Ce chapitre présente une modélisation d'un échangeur air-sol basée sur deux modèles numériques 2D par éléments finis : celui du champ de température du sol et celui de la température de l'air circulant dans l'échangeur. L'**originalité** de cette modélisation est la prise en compte de l'**hétérogénéité du sol** dans l'enfouissement d'un échangeur tel que le lit de pose, le sol d'enrobage, le remblai et la terre végétale. Ces deux modèles sont validés sur une année avec les mesures expérimentales de l'échangeur air-sol de la plateforme géothermique avec un écart maximum de 4 °C.

À partir de cette modélisation, une première étude numérique avec six configurations de sol pour l'enrobage (trois types de sol à deux états d'humidité) met en évidence *l'impact du sol d'enrobage sur les performances énergétiques de l'échangeur air-sol à long terme.* Avec une humidité élevée, supérieure à 17 %, les performances énergétiques peuvent être améliorées de 15,9 % en hiver et de 13,6 % en été. Cette étude montre également l'importance du choix du sol autour d'un échangeur air-sol tel que le mélange sable + bentonite qui permet de stabiliser et d'optimiser l'efficacité énergétique d'un système géothermique de surface.

Une deuxième étude numérique met en avant l'influence d'un événement pluvieux sur les performances énergétiques d'un échangeur air-sol. Celles-ci sont améliorées lors de pluies permettant de garder le sol à son état le plus proche de sa saturation en eau. Cette étude montre *l'influence de la pluie pour améliorer les performances énergétiques d'un échangeur air-sol en augmentant son niveau d'humidité en eau.*

Ces deux études numériques mettent en évidence l'intérêt énergétique à choisir un sol

d'enrobage adapté et à utiliser de l'eau naturelle tel que la pluie pour améliorer l'efficacité énergétique d'un échangeur géothermique. Cette dernière est augmentée par deux constats complémentaires :

- le stockage d'eau en grande quantité et en permanence avec un sol d'enrobage pertinent ;
- l'écoulement de l'eau dans le sol suite à un événement pluvieux.

Ces deux constats nous laissent des pistes d'études pour trouver des solutions technologiques afin d'augmenter l'efficacité énergétique d'un système géothermique de surface.

Conclusion générale et perspectives

Ce travail de thèse propose une analyse des conditions climatiques et géologiques sur les performances énergétiques des systèmes géothermiques de surface.

Dans un premier temps, un état de l'art est mené sur les modélisations (analytiques et numériques) et les études expérimentales portant sur les échangeurs de surface. Ce dernier met en évidence la complexité des interactions météorologie/sol, l'influence de la teneur en eau et de la profondeur sur les propriétés thermo-physiques d'un sol, et l'impact de ces propriétés sur l'efficacité énergétique d'un échangeur horizontal. Faisant suite à ces constats, deux domaines d'améliorations de connaissances scientifiques sont mis en évidence :

- l'impact des conditions climatiques sur la teneur en eau d'un sol jusqu'à la profondeur d'enfouissement des échangeurs de surface ;
- la variation des propriétés thermo-physiques d'un sol poreux sous l'influence de son type de sol, de son état de saturation en eau et de sa compacité.

Tout d'abord, un premier dispositif expérimental est élaboré, conçu, instrumenté et validé pour étudier le profil vertical de teneur en eau d'un sol sous l'influence d'événements pluvieux. Deux campagnes expérimentales sont réalisées avec un sol homogène constitué de sable 0-5 mm, et un sol multicouche composé des couches successives suivantes : de la terre végétale, du remblai, du sablon et d'un autre type de remblai. Les résultats expérimentaux ont permis la modélisation de la variation de la teneur en eau sous la forme d'un profil trapézoïdal. Celui-ci traduit le phénomène d'écoulement de l'eau dans le sol dépendamment des caractéristiques des événements pluvieux (intensité et durée), du type de sol et de sa profondeur.

Dans un second temps, un deuxième dispositif expérimental est conçu afin d'étudier la variabilité des propriétés thermo-physiques d'un sol poreux sous l'influence du type de sol, de son état de saturation en eau et de sa compacité. Pour ce faire, une méthode d'identification de la diffusivité thermique d'un sol poreux est mise en place à partir d'une comparaison entre les mesures et un modèle numérique 2D transitoire par éléments finis. Cette méthode est ensuite testée avec deux types de sol (argile et sable fin) à l'état sec et à l'état saturé en eau. Les résultats obtenus sont sensiblement égaux à ceux de la littérature (norme VDI 4640 Part I [Unt10]) et à ceux mesurés avec l'appareil KD2Pro. Par la suite, la diffusivité thermique est identifiée pour ces deux types de sol à l'état sec et à l'état saturé en eau mais aussi pour différentes contraintes verticales comprises entre 30 et 140 *kPa*. Les résultats expérimentaux montrent que *l'état de saturation et le type*

de sol influencent de manière plus importants la diffusivité thermique d'un sol poreux que les contraintes verticales inférieures à 140 kPa.

Par la suite, mon travail de thèse a consisté à évaluer l'efficacité énergétique d'un échangeur air-sol sous l'influence de différentes conditions climatiques et géologiques. A partir des mesures relevées sur la plateforme géothermique, un modèle 2D transitoire par éléments finis est développé et validé afin de simuler et prédire la température de l'air circulant dans un échangeur air-sol. Ce modèle est conçu de manière à prendre en compte la géométrie de l'échangeur et l'hétérogénéité du sol. Ce dernier se compose de plusieurs couches avec la présence de terre végétale, de remblai, d'un sol d'enrobage et du lit de pose. A partir de ce modèle, une première étude numérique est effectuée pour étudier l'efficacité énergétique d'un échangeur air-sol à long terme sous l'influence de la teneur en eau et du type de sol. Les résultats des simulations numériques montrent que *le type de sol d'enrobage et de sa teneur en eau influencent l'énergie extraite par l'échangeur*. Les différentes configurations simulées peuvent atteindre des variations de performances énergétiques de plus de 15 % lorsque le type du sol d'enrobage ne garantit pas une teneur en eau élevée. L'étude montre également que le choix d'un sol d'enrobage avec un haut pouvoir absorbant en eau, comme la bentonite, peut stabiliser et optimiser l'efficacité énergétique d'un échangeur géothermique de surface. Une deuxième étude numérique est menée sur l'influence des événements pluvieux à court terme. Les résultats montrent la possibilité d'améliorer les performances énergétiques de plus de 5 % sur une période de 48 h et prouvent ainsi que *les conditions climatiques influencent l'efficacité énergétique d'un échangeur géothermique de surface*.

En perspective de ce travail de thèse, les différentes études expérimentales et numériques montrent l'intérêt de garder un état d'humidification élevé de l'eau dans le sol aux alentours d'un échangeur afin d'améliorer ses performances énergétiques. Cette amélioration énergétique est "gratuite" si une solution technologique pertinente est adoptée comme par exemple l'utilisation d'un matériau étanche sous l'échangeur ou avoir recours à des mélanges de sol absorbant l'eau (utilisation de bentonite dans un mélange avec du sable). Ces propositions restent encore des pistes de réflexions à ce jour et une validation expérimentale dans des conditions réelles est nécessaire sur des durées de fonctionnement correspondant à sa durée de vie (supérieure à 15 ans).

A propos des études expérimentales, nous pouvons enrichir les résultats du simulateur de la précipitation de pluie en utilisant une autre configuration de sol. Pour l'étude des propriétés thermo-physiques d'un sol poreux sous l'influence de charges verticales, une amélioration du dispositif expérimental sera envisagée afin d'étudier la variation de la conductivité thermique et de la capacité thermique volumique du sol. Concernant la plateforme expérimentale, un sondage du sol d'enrobage composé de sable et de bento-

nite sera réalisée afin d'étudier le comportement de la bentonite dans le temps avec une analyse de sa composition (présence de bentonite dans la même proportion initiale ?) et de sa teneur en eau.

Concernant l'étude numérique, nous pouvons envisager une amélioration du modèle numérique de l'échangeur air-sol avec la prise en compte de l'environnement (présence de bâtiments) et l'ajout d'un modèle hydrique pour tenir en compte de la variation des propriétés thermo-physiques du sol soumis à des événements pluvieux. La température en surface peut également être remplacée par la température de l'air extérieur en prenant en compte des phénomènes physiques associés tels que le rayonnement solaire, la vitesse du vent, la direction du vent et l'humidité de l'air. Cette modification suggère aussi l'implantation d'une station météorologique sur la plateforme géothermique pour mesurer les données requises. L'amélioration de l'ensemble de ces éléments permettra d'évaluer les performances énergétiques d'un échangeur de surface selon les différentes zones climatiques présentes en France.

Nomenclature

c	capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
C	capacité thermique volumique, $J.m^{-3}.K^{-1}$
D	diffusivité thermique, $m.s^{-2}$
DT	durée d'un événement pluvieux, s
e	effusivité thermique, $J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-\frac{1}{2}}$
E	énergie, Wh
h	échange convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$
H	hauteur de pluie cumulée, m
HR	humidité relative, %
HS	humidité du sol, %
HT	hauteur totale de précipitation, m
i	intensité moyenne maximale, $m.s^{-1}$
k	compacité, %
l	pertes, %
L	longueur, m
n	porosité, %
N	niveau
p	profondeur, m
P	puissance, W
PR	période de retour, an
Sr	degré de saturation, %
t	durée, s
T	température, $^{\circ}C$
U	tension, V
V	volume, m^3
x, y, z	direction x, y, z
z	profondeur, m

Indices et exposants

<i>a</i>	acceptation	<i>a</i>	air
<i>air</i>	air extérieur	<i>ampl</i>	amplitude
<i>c</i>	chauffage	<i>conv</i>	convectif
<i>d</i>	droite	<i>diff</i>	diffusif
<i>dt</i>	double triangle	<i>e</i>	enfouissement
<i>é</i>	électricité	<i>ep</i>	équivalent pétrole
<i>ext</i>	extérieur	<i>f</i>	froid, rafraîchissement
<i>g</i>	gauche	<i>géo</i>	géothermique
<i>int</i>	intérieur	<i>lat</i>	latent
<i>max</i>	maximum ou maximale	<i>min</i>	minimum ou minimale
<i>moy</i>	moyen ou moyenne	<i>p</i>	paroi
<i>prod</i>	production	<i>r</i>	rectangle
<i>s</i>	solide ou sèche	<i>sen</i>	sensible
<i>surf</i>	surface	<i>t</i>	triangle
<i>th</i>	thermique	<i>v</i>	vide
<i>w</i>	water, eau		

Lettres grecques

λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	ϕ	flux ou puissance, W
φ	densité de flux, $W.m^{-2}$	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
θ	pulsation ou fréquence, $rad.s^{-1}$	δ	profondeur de pénétration, m
ω	teneur en eau, $kg.kg^{-1}$		

Abréviations

AIE	Agence Internationale de l'Énergie
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CFD	Computational Fluid Dynamics
COP	Conférences des Parties
EnR	Énergie Renouvelable
FEDER	Fonds Européen de Développement Régional
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GUI	Graphic User Interface
IDF	Intensité-Durée-Fréquence
PAC	Pompe à Chaleur
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle
RT	Réglementation Thermique
TDR	Time Domain Reflectometry
UE	Union Européenne
USDA	United States Department of Agriculture

Bibliographie

- [ABM11] F. ASCIONE, L. BELLIA et F. MINICHELLO, « Earth-to-air heat exchangers for Italian climates », *Renewable Energy* 36.8 (2011), p. 2177–2188, ISSN : 0960-1481.
- [Abu03] N. H. ABU-HAMDEH, « Thermal properties of soils as affected by density and water content », *Biosystems Engineering* 86.1 (2003), p. 97–102.
- [ADE08] BRGM ADEME, *La géothermie : quelles technologies pour quels usages ?*, t. 1 vol (64 p.) Angers : Ademe ; Orléans : BRGM : Editions Brgm, 2008.
- [AGK11] M. H. ABBASPOUR-FARD, A. GHOLAMI et M. KHOJASTEHPUR, « Evaluation of an earth-to-air heat exchanger for the North-East of Iran with semi-arid climate », *International Journal of Green Energy* 8.4 (mai 2011), p. 499–510.
- [AKR01] N.H ABU-HAMDEH, A.I KHDAIR et R.C REEDER, « A comparison of two methods used to evaluate thermal conductivity for some soils », *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44.5 (mar. 2001), p. 1073–1078.
- [Ång63] A.J. ÅNGSTRÖM, « New method of determining the thermal conductivity of bodies », *Phil. Mag.* 25 (1863), p. 130.
- [Bal05] M. BALGHOUTHY et al., « Experimental investigation of thermal and moisture behaviors of wet and dry soils with buried capillary heating system », *Solar Energy* 79.6 (2005), *Polymeric Materials for Solar Energy Applications*, p. 669–681.
- [Ban13] V. BANSAL et al., « Transient effect of soil thermal conductivity and duration of operation on performance of earth air tunnel heat exchanger », *Applied Energy* 103 (2013), p. 1–11.
- [Ban73] C. G. BANKVALL, « Guarded hot plate apparatus for the investigation of thermal insulations », *Matériaux et Constructions* 6.31 (1973).
- [BD94] J.-C. BATSALÉ et A. DEGIOVANNI, « Mesure de résistance thermique de plaques minces à l'aide d'une mini-plaque chaude », *Revue générale de thermique* 390-391 (1994), p. 387–391.
- [Bea72] J. BEAR, *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, Inc., New York, 1972.
- [Bel13] B. BELFORT et al., « On equivalent hydraulic conductivity for oscillation-free solutions of Richard's equation », *Journal of Hydrology* 505 (2013), p. 202–217.

-
- [Ber15] R. BERTANI, « Geothermal power generation in the world 2010-2014 », *Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia*, (19-25 April 2015).
- [BM89] T. L. BRANDON et J. K. MITCHELL, « Factors influencing thermal resistivity of sands », *Journal of Geotechnical Engineering* 115.12 (déc. 1989), p. 1683–1698.
- [Boj97] M. BOJIC et al., « Numerical simulation, technical and economic evaluation of air-to-earth heat exchanger coupled to a building », *Energy* 22.12 (1997), p. 1151–1158.
- [Bou04] A. BOUDENNE et al., « A simultaneous characterization of thermal conductivity and diffusivity of polymer materials by a periodic method », *Applied Physics* 37.1 (2004), p. 132–139.
- [BS03] V. BADESCU et B. SICRE, « Renewable energy for passive house heating : II. Model », *Energy and Buildings* 35.11 (2003), p. 1085–1096.
- [CC75] S.W. CHURCHILL et H.H. CHU, « Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder », *Int. J. Heat Mass Transfer* 7 (1975), p. 73–83.
- [CD83] J. CLAEISSON et A. DUNAND, *Heat extraction from the ground by horizontal pipes*, rapp. tech., Institut de mécanique de Grenoble, 1983.
- [Chu12] S. CHUDZIK, « Measurement of thermal parameters of a heat insulating material using infrared thermography », *Infrared Physics & Technology* 7 (2012), p. 73–83.
- [CK08] J. CÔTÉ et J.-M. KONRAD, « Assessment of structure effects on the thermal conductivity of two-phase porous geomaterials », *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52.3-4 (2008), p. 796–804.
- [CK49] A. CAQUOT et J. KERISEL, *Traité de mécanique des sols*, sous la dir. de GAUTHIER-VILLARS, 1949.
- [Col11] COLLECTIF, *Solutions géothermiques par pompes à chaleur dans le bâtiment*, sous la dir. de Ginger CATED, 2011.
- [Cow61] R. COWAN, « Proposed Method of Measuring Thermal Diffusivity at High Temperatures », *Journal of Applied Physics* 32 (1961), p. 1363–1370.
- [DC00] Pierre. DELAGE et Yu-Jun. CUI, *L'eau dans les sols non saturés*, rapp. tech., Techniques de l'Ingénieur, 2000.
- [Deg84] J-M. DEGBOMONT, *Le chauffage par hypocauste dans l'habitat privé*, sous la dir. de Service d'archéologie préhistorique et centre interdisciplinaire de recherches archéologiques de l'université de LIÈGE, Eraul17, 1984.

-
- [Deg86] A. DEGIOVANNI, « Une nouvelle technique d'identification de la diffusivité thermique par la méthode flash », *Revue Phys. Appl.* 21 (1986), p. 229–237.
- [Del10] O. DELESTRE, « Rain water overland flow on agricultural fields simulation », Theses, Université d'Orléans, juil. 2010.
- [Dun82] A. DUNAND, « Modélisations des transferts thermiques et hydriques dans le sol. Application à l'extraction d'énergie thermique par pompe à chaleur couplée à un réseau horizontal de tuyaux enterrés. », thèse de doct., ENSAM, 1982.
- [eur12] Commission EUROPÉENNE, *Feuille de route pour l'énergie à l'horizon 2050*, Union européenne, 2012.
- [Eur15] Commission EUROPÉENNE, *Rapport de situation de l'Action pour le climat, incluant le rapport sur le fonctionnement du marché européen du carbone et le rapport sur le réexamen de la directive 2009/31/CE relative au stockage géologique du dioxyde de carbone*, Commission au parlement européen et au conseil, 2015.
- [Fer98] R. FERRANDES, *La chaleur de la Terre : de l'origine de La chaleur à l'exploitation des gisements géothermiques*, sous la dir. d'ADEME Editions 1998, 1998.
- [Fou22] J-B. J. FOURIER, *Théorie analytique de la chaleur*, Chez Firmin Didot, père et fils, 1822.
- [Gan14] G. GAN, « Dynamic interactions between the ground heat exchanger and environments in earth–air tunnel ventilation of buildings », *Energy and Buildings* 85 (déc. 2014), p. 12–22.
- [Gan15] G. GAN, « Simulation of dynamic interactions of the earth–air heat exchanger with soil and atmosphere for preheating of ventilation air », *Applied Energy* 158 (nov. 2015), p. 118–132.
- [Gan17] G. GAN, « Dynamic thermal simulation of horizontal ground heat exchangers for renewable heating and ventilation of buildings », *Renewable Energy* 103 (avr. 2017), p. 361–371.
- [Gao16] Y. GAO et al., « Thermal performance improvement of a horizontal ground-coupled heat exchanger by rainwater harvest », *Energy and Buildings* 110 (2016), p. 302–313.
- [Gar58] W. R. GARDNER, « Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table », *Soil Science* (1958).

-
- [Gen80] M. Th. Van GENUCHTEN, « A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils », *Soil science society of America journal* (1980).
- [géo15] Association française des professionnels de la GÉOTHERMIE, *La géothermie en France, étude du marché 2015*, rapp. tech., 2015.
- [GIE14] GIEC, « Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I,II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat », *GIEC, Genève, Suisse* (2014), 161 p.
- [GL85] B. S. GHUMAN et R. LAL, « Thermal conductivity, thermal diffusivity, and thermal capacity of some Nigerian soils », *Soil Science* 139.1 (jan. 1985), p. 74–80.
- [Go15] G. GO et al., « A new performance evaluation algorithm for horizontal GCHPs (ground coupled heat pump systems) that considers rainfall infiltration », *Energy* 83 (avr. 2015), p. 766–777.
- [Gra97] R. B. GRAYSON et al., « Preferred states in spatial soil moisture patterns : Local and nonlocal controls », *Water resources research* (1997).
- [Gre15] « Règles de l'Art GRENELLE ENVIRONNEMENT 2012 », *Puits climatiques, concept et dimensionnement*, rapp. tech., Mars 2015.
- [GT06] M. D. GHOSAL et G. N. TIWARI, « Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger with a greenhouse », *Energy conversion and management* 47.13-14 (2006), p. 1779–1798.
- [Gus91] S.E. GUSTAFSSON, « Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials », *Rev. Sci. Instrum* 62.3 (1991), p. 797–804.
- [Ham03] U. HAMMERSCHMIDT, « A new pulse hot strip sensor for measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of solids », *International Journal of Thermophysics* 24.3 (2003), p. 675–682.
- [He05] Y. HE, « Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor. Part 1. Theoretical considerations », *Thermochimica Acta* (2005).
- [Her10] B. HERZOG, *Le puits canadien*, sous la dir. d'EYROLLES, 2010.
- [Hol02] P. HOLMULLER, « Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments Mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique », thèse de doct., 2002.

-
- [Hol03] P. HOLLMULLER, « Analytical characterisation of amplitude-dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers », *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46.22 (oct. 2003), p. 4303–4317.
- [INT] INTERREG, URL : <http://www.interreg-rhin-sup.eu/>.
- [IP48] L. R. INGERSOLL et H. J. PLASS, « Theory of the ground heat pipe heat source for the heatpump », *Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers*. (1948).
- [ISO07] ISO13370, *Performance thermique des bâtiments - Transfers de chaleur par le sol - Méthodes de calcul*, 2007.
- [Iva10] Valeriy Y. IVANOV et al., « Hysteresis of soil moisture spatial heterogeneity and the “homogenizing” effect of vegetation », *Water Resources Research* 46.9 (sept. 2010).
- [JAK06] Y. JANNOT, Z. ACEM et A. KANMOGNE, « Transient hot plate method with two temperature measurements for thermal characterization of metals », *Meas. Sci. Technol.* 17 (2006), p. 69–74.
- [JDP09] Y. JANNOT, A. DEGIOVANNI et G. PAYET, « thermal conductivity measurement of insulating materials with a three layers device », *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52.5-6 (2009), p. 1105–1111.
- [JM04] Y. JANNOT et P. MEUKAM, « Simplified estimation method for the determination of thermal effusivity and thermal conductivity with a low cost hot strip », *Measurement Science and Technology* 15 (2004), p. 1932–1938.
- [KA65] T. KASUDA et P. R. ARCHENBACH, *Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States*, rapp. tech., Mechanical systems section Building research division, 1965.
- [Ker49] M. S. KERSTEN, *Laboratory research for the determination of thermal properties of soils*, Arctic Construction, Frost Effects Laboratory (U.S.) Engineer Research et Development Center (U.S.), 1949.
- [KS03] S. KRISHNAIAH et D. N. SINGH, « Determination of influence of various parameters on thermal properties of soils », *International Communications in Heat and Mass Transfer* 30.6 (août 2003), p. 861–870.
- [Lav77] J. LAVIGNE, *Les ressources géothermiques françaises, possibilités de mise en valeur*, rapp. tech., Bureau de recherches géologiques et minières, 1977.
- [LB15] J. W. LUND et T. L. BOYD, « Direct utilization of geothermal energy 2015 Worldwide Review », *Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia*, (19-25 April 2015).
- [Lem08] J. LEMALE, *La géothermie*, Dunond, 2008.

-
- [Li09] Z. LI et al., « Experimental study of a ground sink direct cooling system in cold areas », *Energy and Buildings* 41.11 (2009), p. 1233–1237.
- [LL10a] P. LAPAIGE et J. LEMALE, *Géothermie de surface - Présentation et pompes à chaleur*, rapp. tech., Techniques de l'ingénieur, 2010.
- [LL10b] P. LAPAIGE et J. LEMALE, *Géothermie de surface - Puits canadiens, capteurs enterrés et géostructures*, rapp. tech., Technoques de l'ingénieur, 2010.
- [log12] Ministère de l'égalité des territoires et du LOGEMENT, *Arrêté du 28 décembre 2012 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments autres que ceux concernés par l'article 2 du décret du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions*, 2012.
- [Log14] Direction de l'Aménagement du LOGEMENT ET DE LA NATURE, *Conditions pluviométriques locales*, rapp. tech., 2014.
- [LTA98] W.H LEONG, V.R TARNAWSKI et A AITTOÄKI, « Effect of soil type and moisture content on ground heat pump performance », *International Journal of Refrigeration* 21.8 (1998), p. 595–606.
- [LUF07] J. LIPIEC, B. USOWICZ et A. FERRERO, « Impact of soil compaction and wetness on thermal properties of sloping vineyard soil », *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50.19–20 (2007), p. 3837–3847.
- [LW91] T. W. LAMBE et R. V. WHITMAN, *Soil Mechanics*, JOHN WILEY & SONS INC, 11 jan. 1991, 576 p.
- [Mar68] J. C. MARÉCHAL, « Mesure de la conductivité thermique par la méthode du champ thermique unidirectionnelle », *Matériau et. Constructions* 5 (1968), p. 443–456.
- [Mih94] G. MIHALAKAKOU et al., « Impact of ground cover on the efficiencies of earth-to-air heat exchangers », *Applied Energy* 48.1 (jan. 1994), p. 19–32.
- [Mir98] P. MIROSLAW, « Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger : validation and sensitivity analysis », *International Journal of Energy Research* 22.11 (1998), p. 965–979.
- [Moh15] M. MOHAMED et al., « Effects of coolant flow rate, groundwater table fluctuations and infiltration of rainwater on the efficiency of heat recovery from near surface soil layers », *Geothermics* 53 (2015), p. 171–182.
- [MSA94] G. MIHALAKAKOU, M. SANTAMOURIS et D. ASIMAKOPOULOS, « Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers », *Solar Energy* 53.3 (sept. 1994), p. 301–305.

-
- [NB12] M. M. NAMIN et M. R. BOROOMAND, « A time splitting algorithm for numerical solution of Richards equation », *Journal of Hydrology* 444-445 (2012), p. 10–21.
- [NC14] Y. NAM et H. CHAE, « Numerical simulation for the optimum design of ground source heat pump system using building foundation as horizontal heat exchanger », *Energy* 73 (août 2014), p. 933–942.
- [NEG15] S. NAYLOR, K. M. ELLETT et A. R. GUSTIN, « Spatiotemporal variability of ground thermal properties in glacial sediments and implications for horizontal ground heat exchanger design », *Renewable Energy* 81 (2015), p. 21–30.
- [NN81] Y. NAGAZAKA et A. NAGASHIMA, « Simultaneous measurement of the thermal conductivity and the thermal diffusivity of liquids by the transient hot-wire method », *Rev. Sci. Instrum.* 52.2 (1981), p. 229–232.
- [Now14] Hossein NOWAMOOZ et al., « Finite difference modeling of heat distribution in multilayer soils with time-spatial hydrothermal properties », *Renewable Energy* 76 (2014), p. 7–15, ISSN : 0960-1481, DOI : 10.1016/j.renene.2014.11.008.
- [Par61] W. PARKER et al., « Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity », *Journal of Applied Physics* 32 (1961), p. 1679–1684.
- [Per11] J-M. PERCEBOIS, *Le guide du chauffage géothermique*, t. 1 vol (170 p.) Paris : Eyrolles, 2011.
- [PES04] PEST, *Model-Independent Parameter Estimation, User Manual : 5th Edition*, 2004.
- [PG00] C. POMPEO et C. GUERET, *Conductivité thermique des matériaux*, rapp. tech., NF EN 12524, 2000.
- [Phi10] M. PHILIPPE, « Développement et validation expérimentale de modèles d'échangeurs géothermiques horizontaux et verticaux pour le chauffage de bâtiments résidentiels », thèse de doct., MINES ParisTech, 2010, 1 vol. (130 p.)
- [Pie96] M. PIECHOWSKI, « A ground coupled heat pump system with Energy storage », thèse de doct., Melbourne University, 1996.
- [Pin08] P. PINEL, *Procedure for dimensioning horizontal exchanger*, rapp. tech., Groundreach report, April 2008.
- [PJ03] M. De PAEPE et A. JANSSENS, « Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers », *Energy and Buildings* 35.4 (2003), p. 389–397.

-
- [Pol15] Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la POLLUTION ATMOSPHERIQUE (CITEPA), *Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Séries sectorielles et analyses étendues*, rapp. tech., 2015.
- [Pon88] F. De PONTE et al., « Reference guarded hot plate apparatus for the determination of steady-state thermal transmission properties in agreement with the new international standard ISO 8302 », *Thermal Conductivity* 19 (1988).
- [Ri10] P. RIEDERER et F. Dastot (ILLUSTRATIONS), *Pompe à chaleur géothermique : chauffage et rafraîchissement en maison individuelle : concept, mise en oeuvre et entretien*, t. 1 vol (97 p.) Marne-la-Vallée : CSTB, 2010.
- [RJ71] Green R.E. et Corey J.C., « Calculation of hydraulic conductivity : a further evaluation of some predictive methods », *Soil Sci. Soc* 35 (1971), p. 3–8.
- [Sal06] T. SALOMONE et al., *Dimensionnement du "puits climatique" Rapport final*, rapp. tech., PREBAT ADEME 04 04C 000 1, Région Languedoc-Roussillon, 2006.
- [San95] M. SANTAMOURIS et al., « On the performance of buildings coupled with earth to air heat exchangers », *Solar Energy* 54.6 (juin 1995), p. 375–380.
- [Sas82] A. SASENAVE, « La mini-simulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. », *sér. Hydrol. XiX.4* (1982).
- [Sch15] J. SCHMITTBUHL, « La géothermie profonde - la recherche en Alsace aujourd'hui », *Conférence Jardins des Sciences*, 2015.
- [SKK84] L. A. SALOMONE, W. D. KOVACS et T. KUSUDA, « Thermal performance of fine-grained soils », *Journal of Geotechnical Engineering* 110.3 (mar. 1984), p. 359–374.
- [TB93] A. TROMBE et B. BOURRET, *Contrat puits provençal*, rapp. tech., INSA Toulouse, 1993.
- [Teu07] A. J. TEULING et al., « Climate variability effects on spatial soil moisture dynamics », *Geophysical Research Letters* 34.6 (mar. 2007).
- [Thi08] S. THIERS, « Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive », thèse de doct., Ecole nationale supérieure des Mines de Paris, 2008.
- [Tho08] B. THOMAS, « Récupération de la chaleur des eaux usées - Retour d'expériences faites en Suisses et en Allemagne », *Alliance Genre et Eau* (2008).
- [TP08] S. THIERS et B. PEUPOURTIER, « Thermal and environmental assessment of a passive building equipped with an earth-to-air heat exchanger in France », *Solar Energy* 82.9 (sept. 2008), p. 820–831.

-
- [TT05] A. J. TEULING et P. A. TROCH, « Improved understanding of soil moisture variability dynamics », *Geophysical research letters* (2005).
- [Uni15] Nations UNIES, « Convention-cadre sur les Changements climatiques », *Conférence des Parties - Vingt et unième session*, 2015.
- [Unt10] Thermische Nutzung des UNTERGRUNDS, *VDI 4640 Part 1*, rapp. tech., Verein Deutscher Ingenieure, 2010.
- [Uso13] B. USOWICZ et al., « Effects of aggregate size on soil thermal conductivity : Comparison of measured and model-predicted data », *International Journal of Heat and Mass Transfer* 57.2 (2013), p. 536–541.
- [Uso96] B. USOWICZ, « Spatial variability of soil thermal properties in cultivated fields », *Soil and Tillage Research* 39.1-2 (nov. 1996), p. 85–100.
- [Ver07] H. VERECKEN et al., « Explaining soil moisture variability as a function of mean soil moisture : A stochastic unsaturated flow perspective », *Geophysical research letters* (2007).
- [ZD93] X. ZHANG et A. DEGIOVANNI, « Mesure de l’effusivité thermique de matériaux solides et homogènes par une méthode de « sonde » plane », *Journal de Physique III* 6 (1993).
- [ZDM93] X. ZHANG, A. DEGIOVANNI et D. MAILLET, « Hot-wire measurement of thermal conductivity of solids : a new approach », *High Temperatures – High Pressures* 25 (1993), p. 557–584.

Annexe A : Enjeux environnementaux et énergétiques

Depuis 1850, année à laquelle débute les mesures instrumentales, une tendance claire du réchauffement climatique est observable sur l'ensemble de la planète. Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (**GIEC**) dénonce les activités humaines causant des émissions de gaz à effet de serre comme une cause fortement probable. Un moyen de quantifier l'impact de ces gaz sur le réchauffement climatique est le recours à l'indicateur du Pouvoir de Réchauffement Global (**PRG**) [Pol15]. En 2014, le PRG relatif à la France métropolitaine est estimé à 446 Mt CO₂e et à 392 Mt CO₂e en prenant en compte (**UTCATF** : Utilisation des Terres, ses Changements, l'Agriculture et la Forêt) qui correspond aux émissions absorbées par les plantes et les forêts. Depuis 1990, voir la figure 5.26, les émissions totales de GES sont à la baisse avec une généralisation dans tous les secteurs. Le secteur du bâtiment représente une part de 14 %. L'objectif fixé en 2020 par l'Union Européenne, avec le plan *Action pour le climat*, est une réduction de 20 % des GES par rapport à 1990.

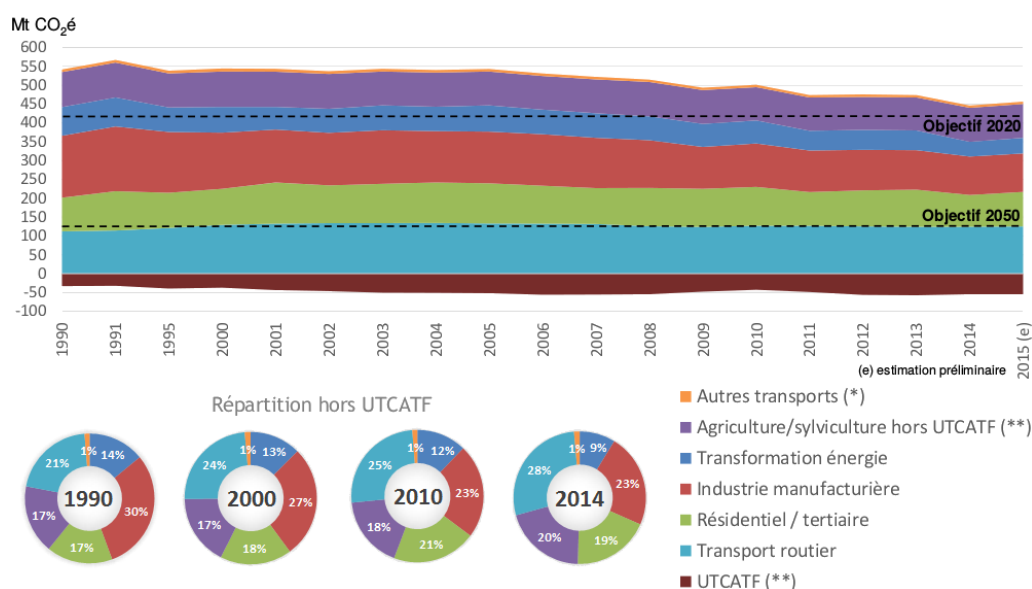
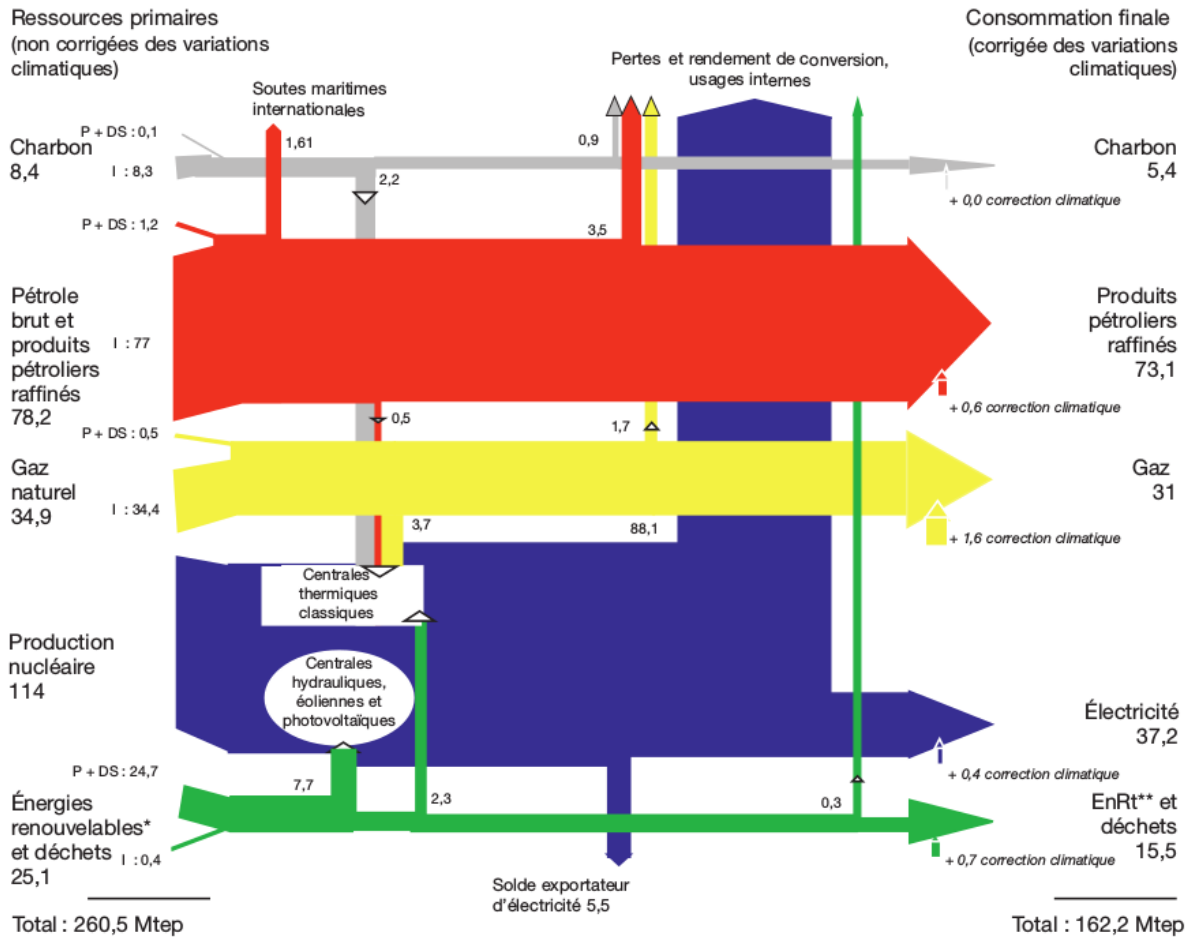


Figure 5.26 – Émissions atmosphériques par secteur en France métropolitaine [Pol15].

L'origine des GES est essentiellement liée à la transformation des ressources primaires en énergie finale. Il semble intéressant d'étudier le bilan énergétique de la France pour comprendre pourquoi les énergies renouvelables (**EnR**) sont une réponse au réchauffement climatique. Le bilan énergétique d'un système peut se représenter par un diagramme de Sankey.

Celui-ci est applicable au bilan énergétique de la France en prenant en compte des différentes ressources d'énergie primaire comme données d'entrée, la consommation finale comme donnée de sortie et les pertes par les usages internes.



P : production nationale d'énergie primaire. *DS* : déstockage. *I* : solde importateur.

* y compris hydraulique, éolien et photovoltaïque.

** énergies renouvelables thermiques (bois, déchets de bois, solaire thermique, biocarburants, pompes à chaleur...).

Figure 5.27 – Bilan énergétique de la France en 2015.

En 2015, le bilan énergétique de la France (figure 5.27) a mobilisé une ressource primaire de 260,5 Mtep pour fournir les besoins en énergie des français à hauteur de 162,2 Mtep. Les postes émetteurs de GES (Charbon, Pétrole brut et produits pétroliers raffinés, et le gaz naturel) représentent une part de 47 % par rapport aux ressources primaires totales. Concernant les énergies vertes (renouvelables et les déchets), elles sont peu représentées avec une part de 10 %. La faible part des EnR laisse à penser que le développement des technologies à EnR permettrait de réduire les ressources en énergie primaire et ainsi de diminuer les émissions de GES.

En outre, ce constat s'applique tout à fait au secteur résidentiel/tertiaire. Celui-ci représente 45 % de la consommation totale d'énergie et est le secteur le plus énergivore. Sa consommation est de 45,0 Mtep pour le résidentiel et de 22,0 Mtep pour le tertiaire avec des données corrigées des variations climatiques.

Annexe B : Résultats expérimentaux du profil vertical de la teneur en eaux soumis à des événements pluvieux

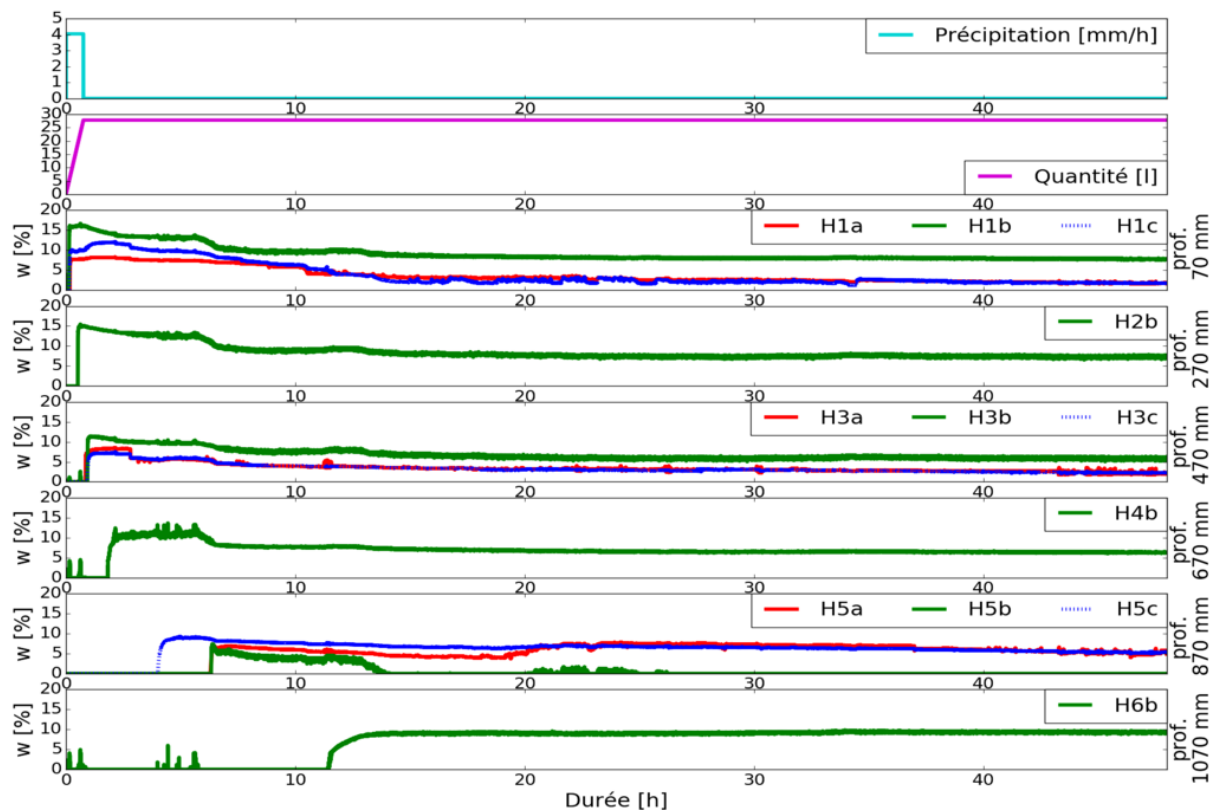


Figure 5.28 – Résultats expérimentaux du 1^{er} essai avec un sol uniforme.

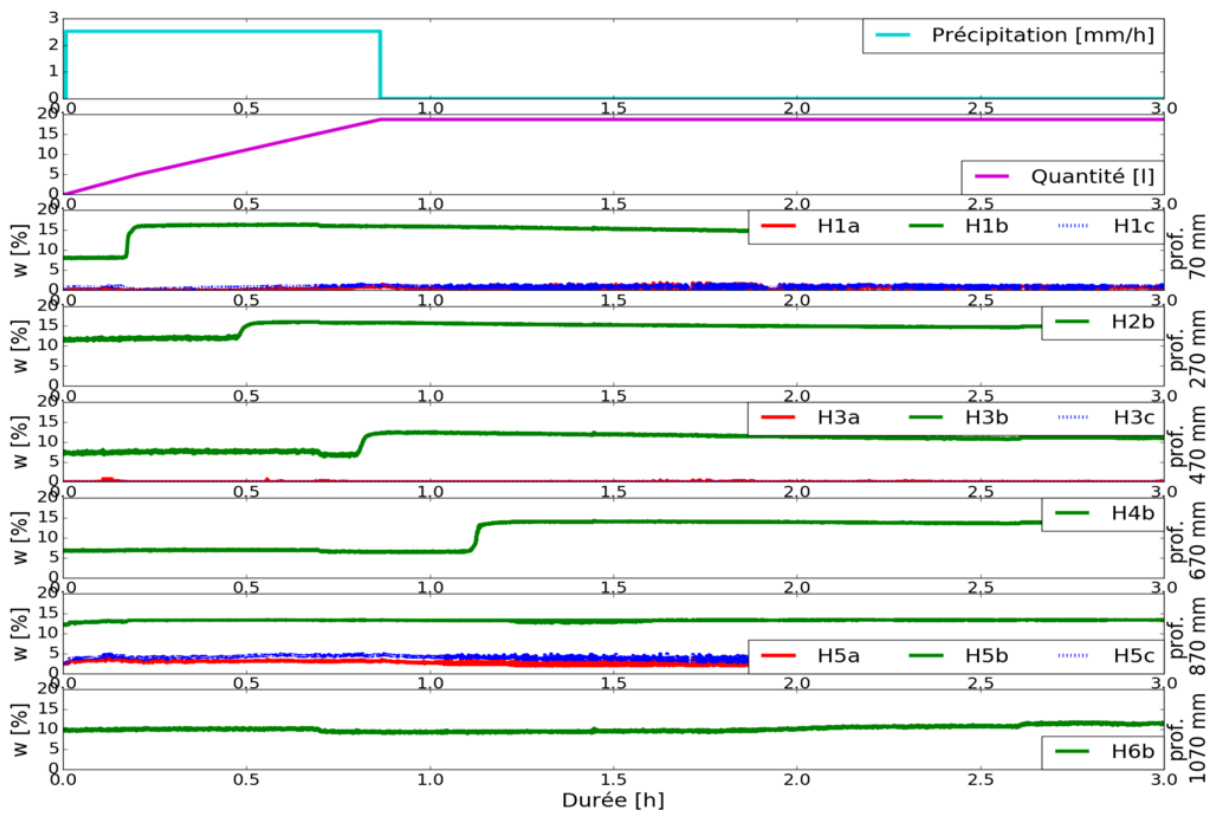


Figure 5.29 – Résultats expérimentaux du 2^{ème} essai avec un sol uniforme.

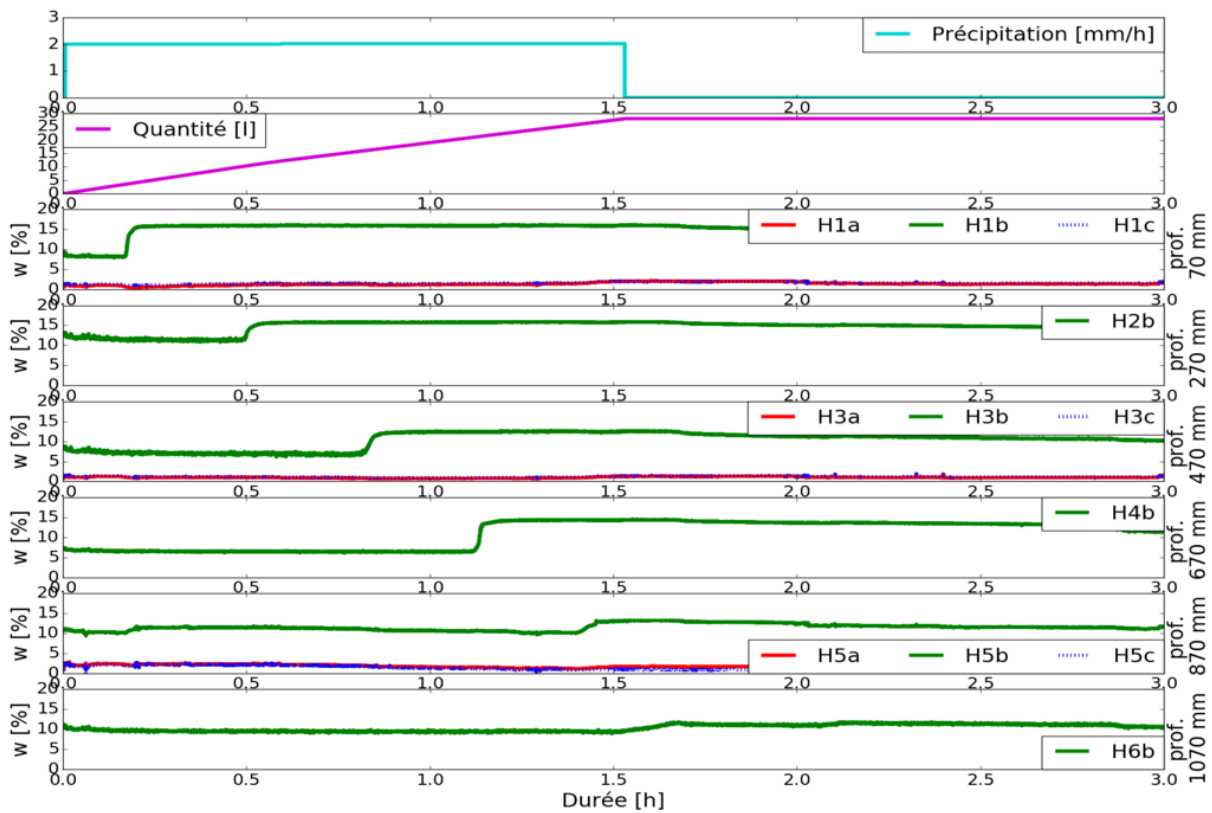


Figure 5.30 – Résultats expérimentaux du 3^{ème} essai avec un sol uniforme.

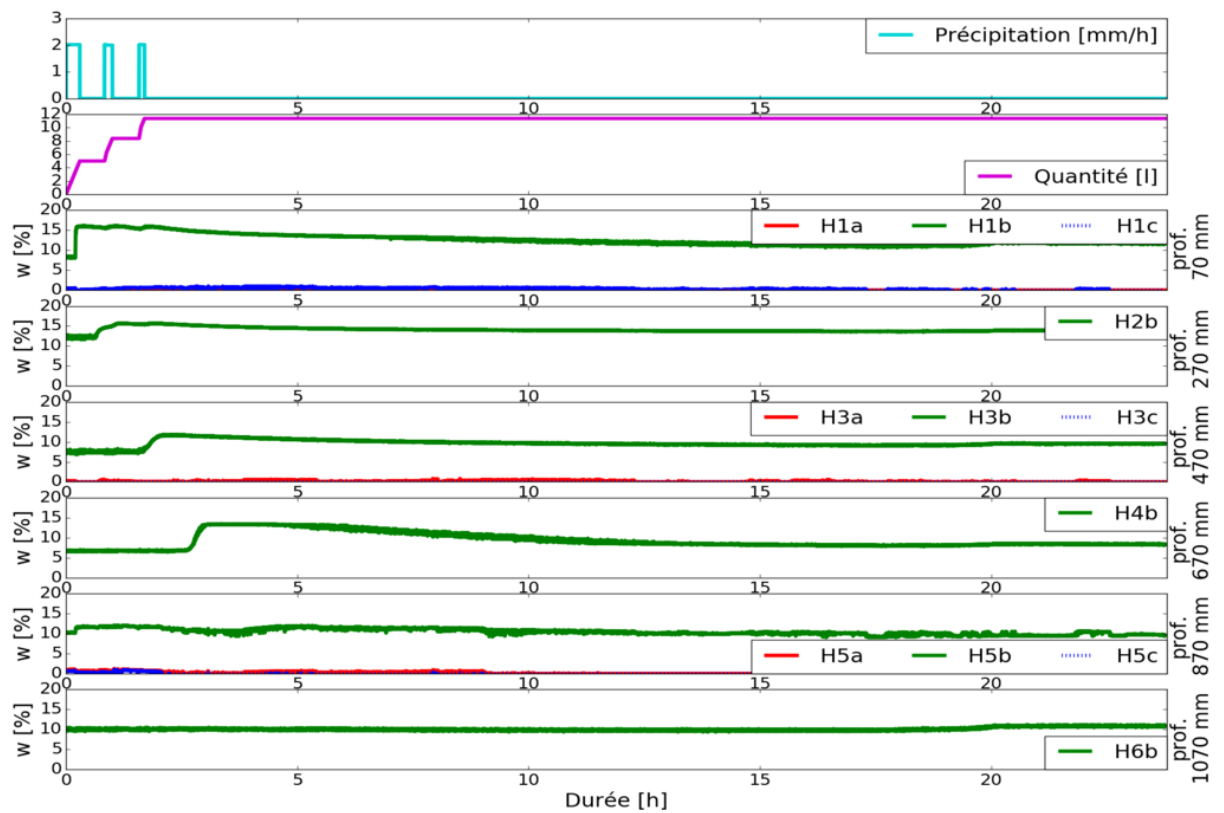


Figure 5.31 – Résultats expérimentaux du 4^{ème} essai avec un sol uniforme.

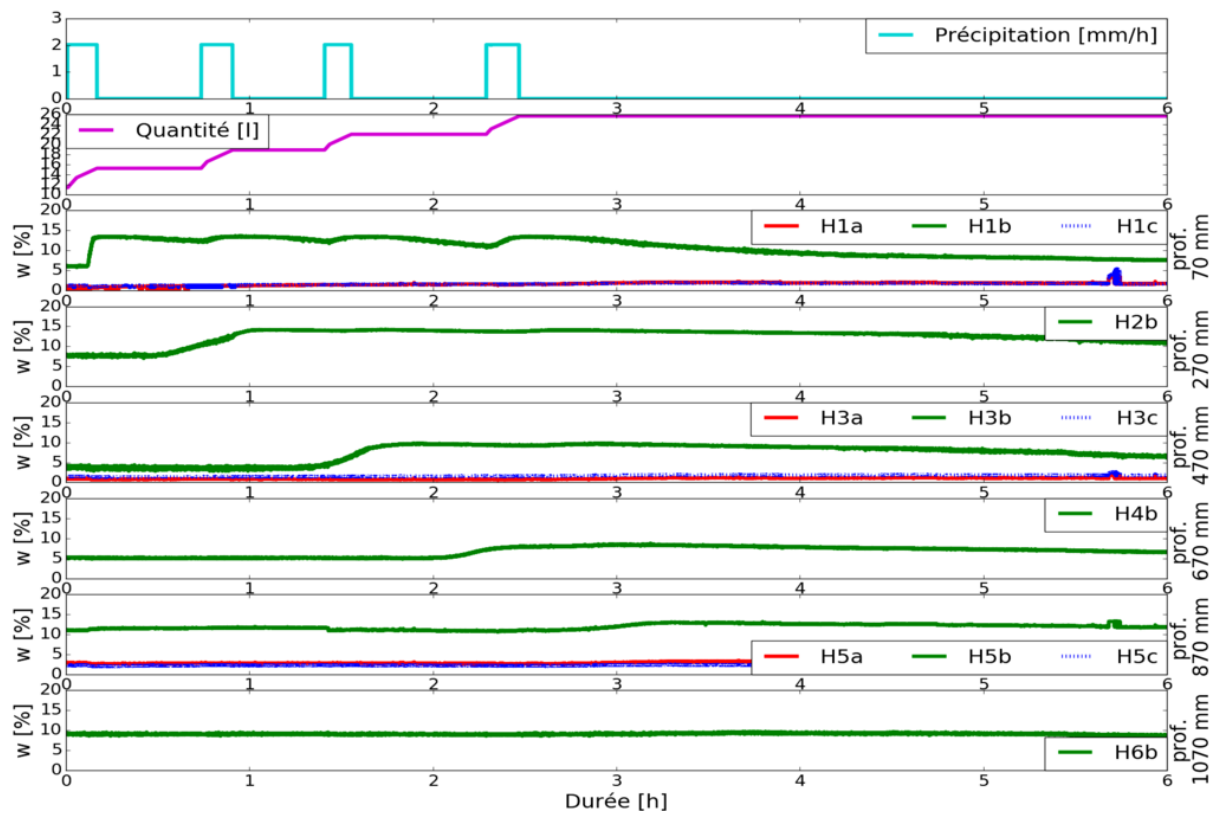


Figure 5.32 – Résultats expérimentaux du 5^{ème} essai avec un sol uniforme pour le premier événement pluvieux.

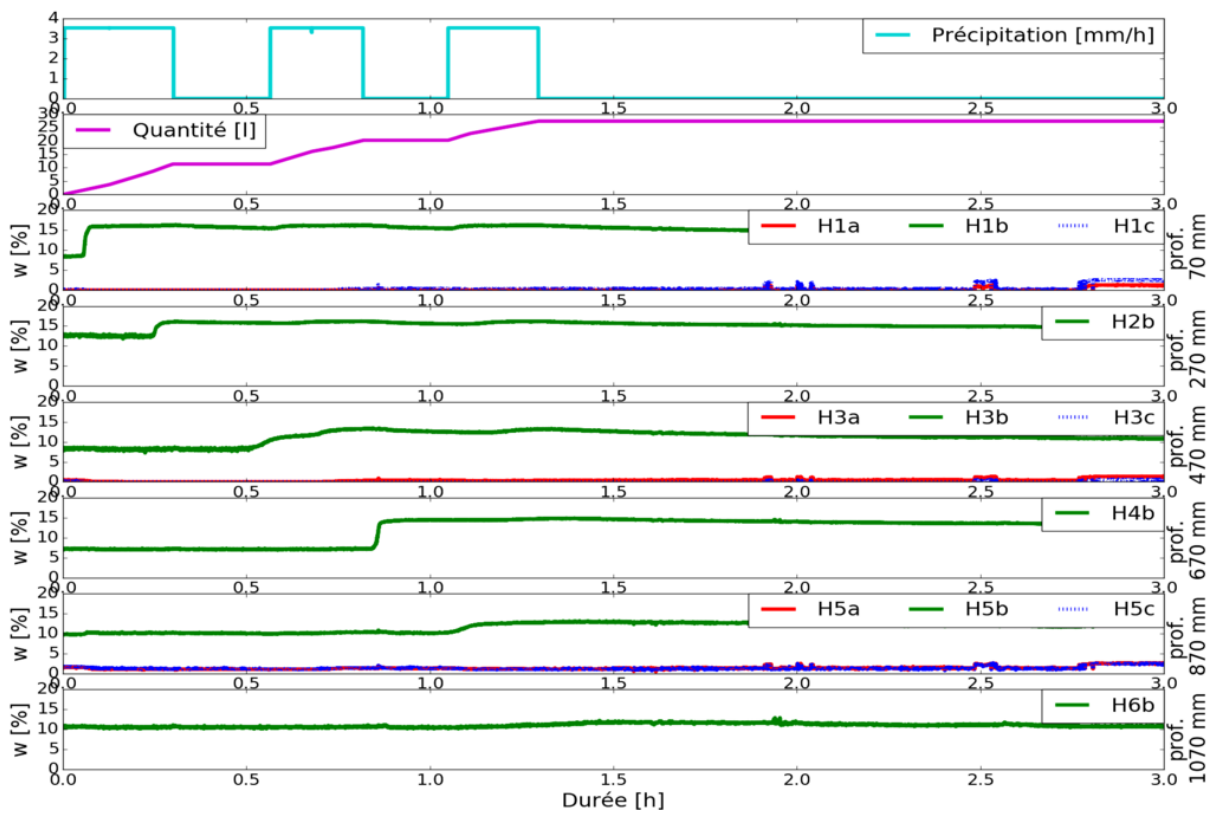


Figure 5.33 – Résultats expérimentaux du 6^{ème} essai avec un sol uniforme.

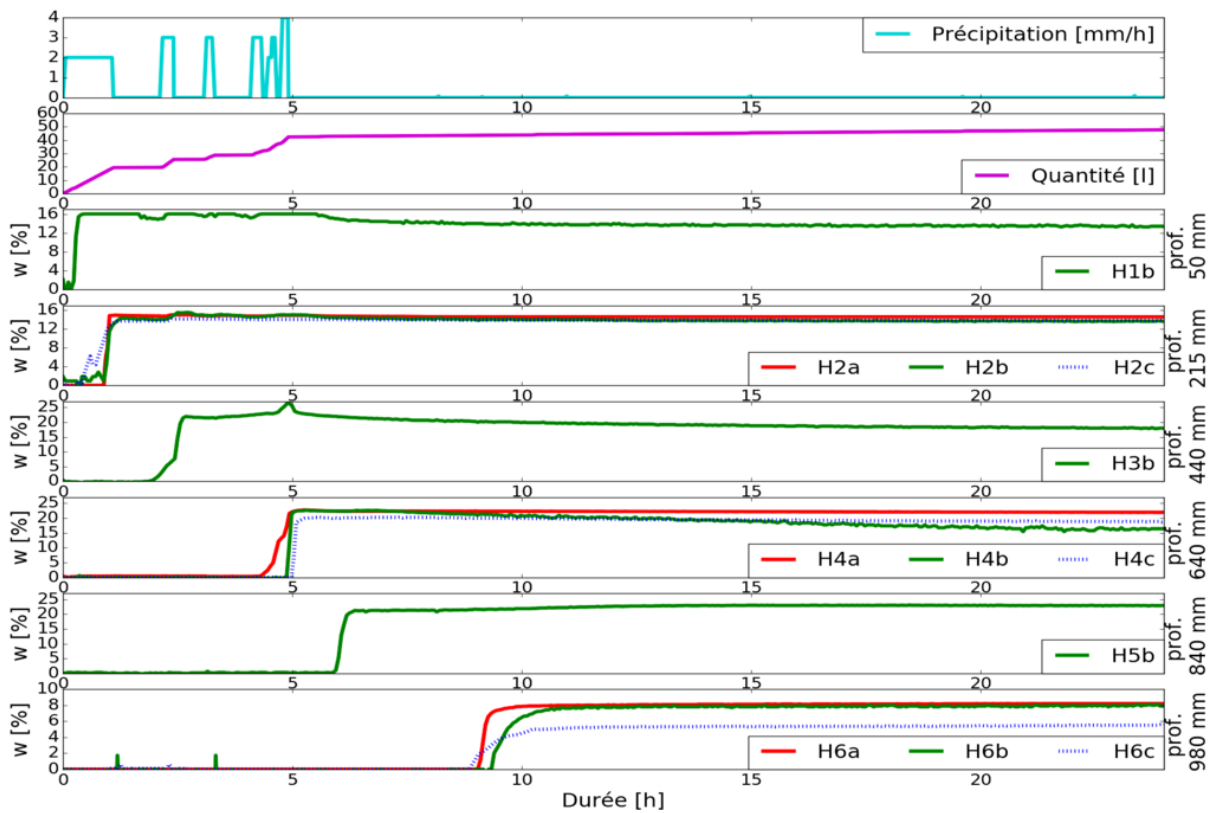


Figure 5.34 – Résultats expérimentaux du 1^{er} essai avec un sol multicouche.

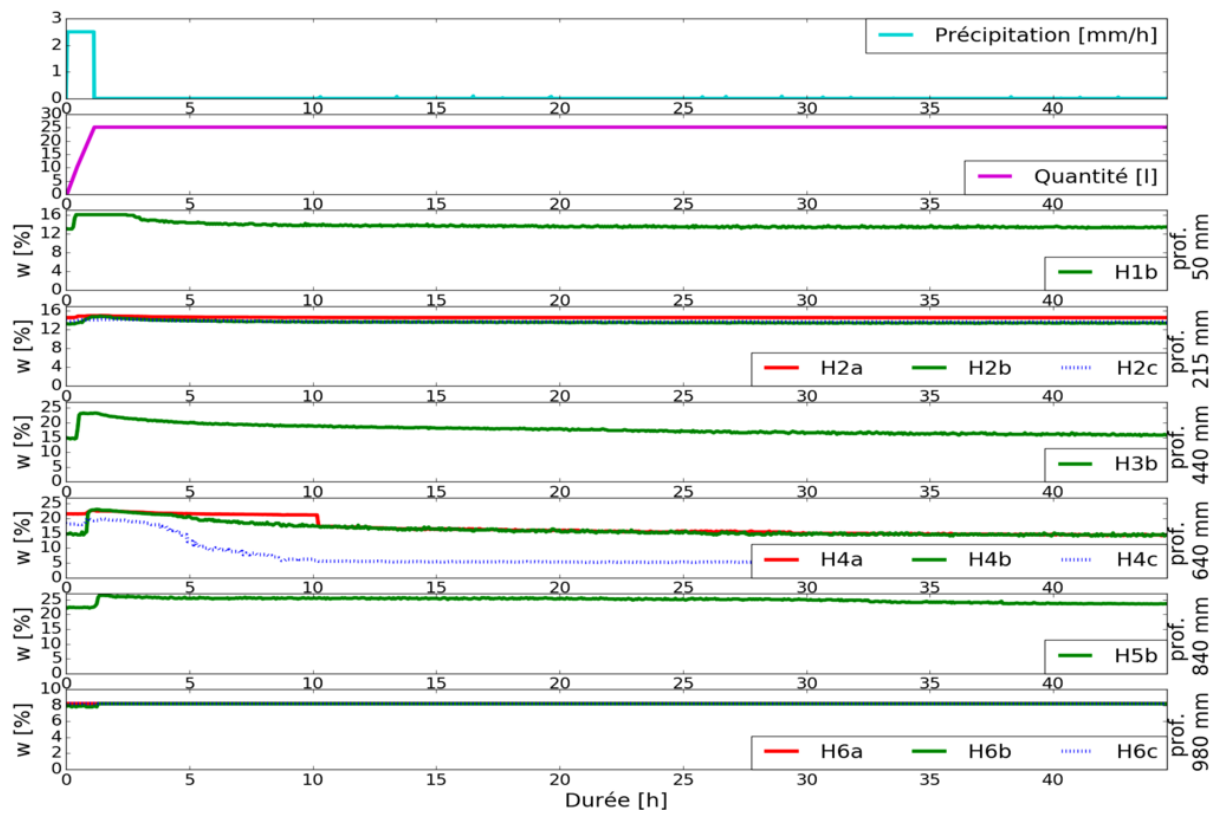


Figure 5.35 – Résultats expérimentaux du 2^{ème} essai avec un sol multicouche.

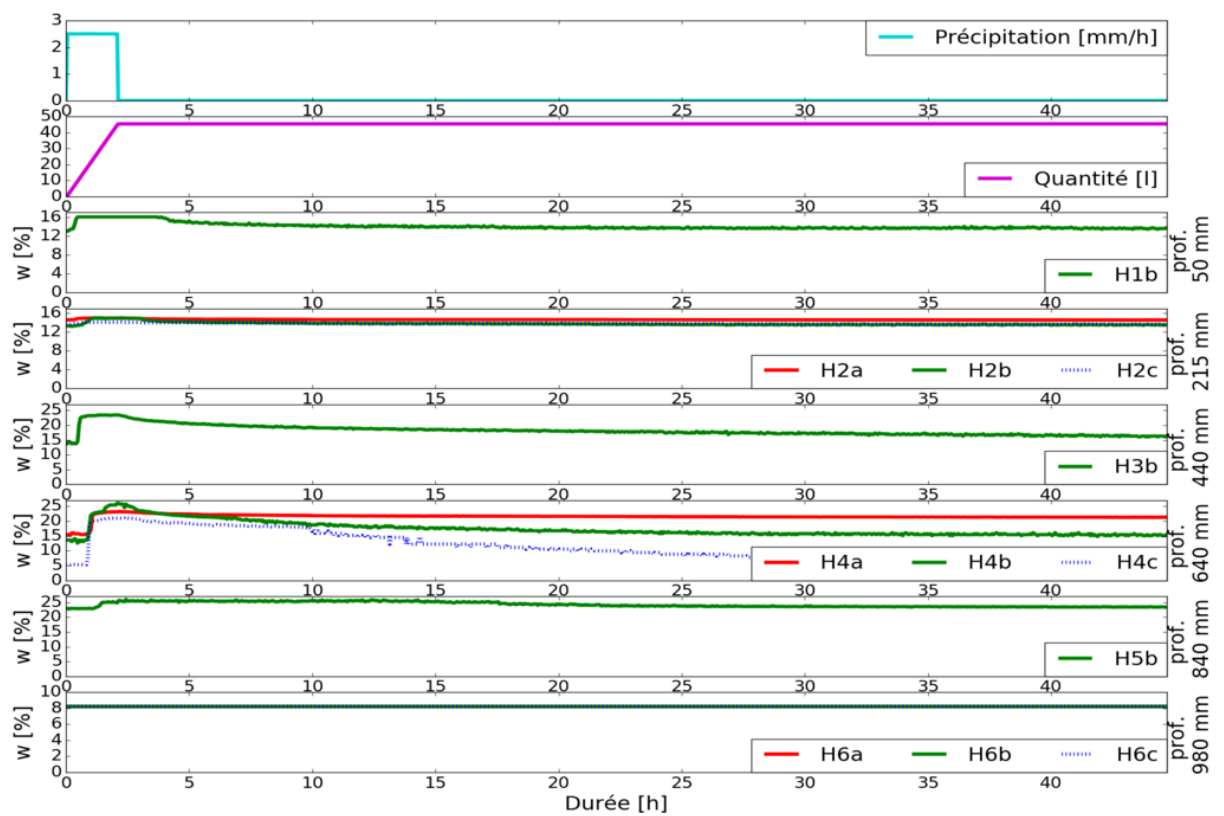


Figure 5.36 – Résultats expérimentaux du 3^{ème} essai avec un sol multicouche.

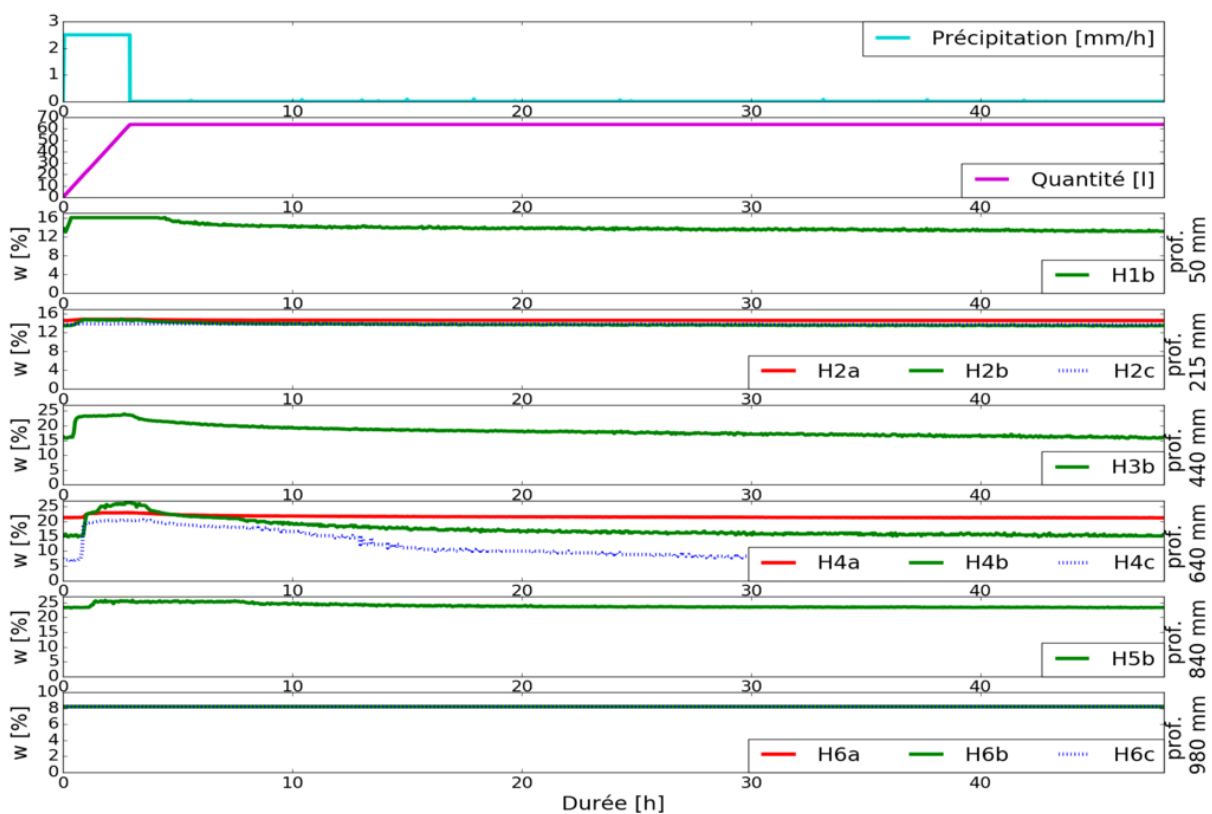


Figure 5.37 – Résultats expérimentaux du 4^{ème} essai avec un sol multicouche.

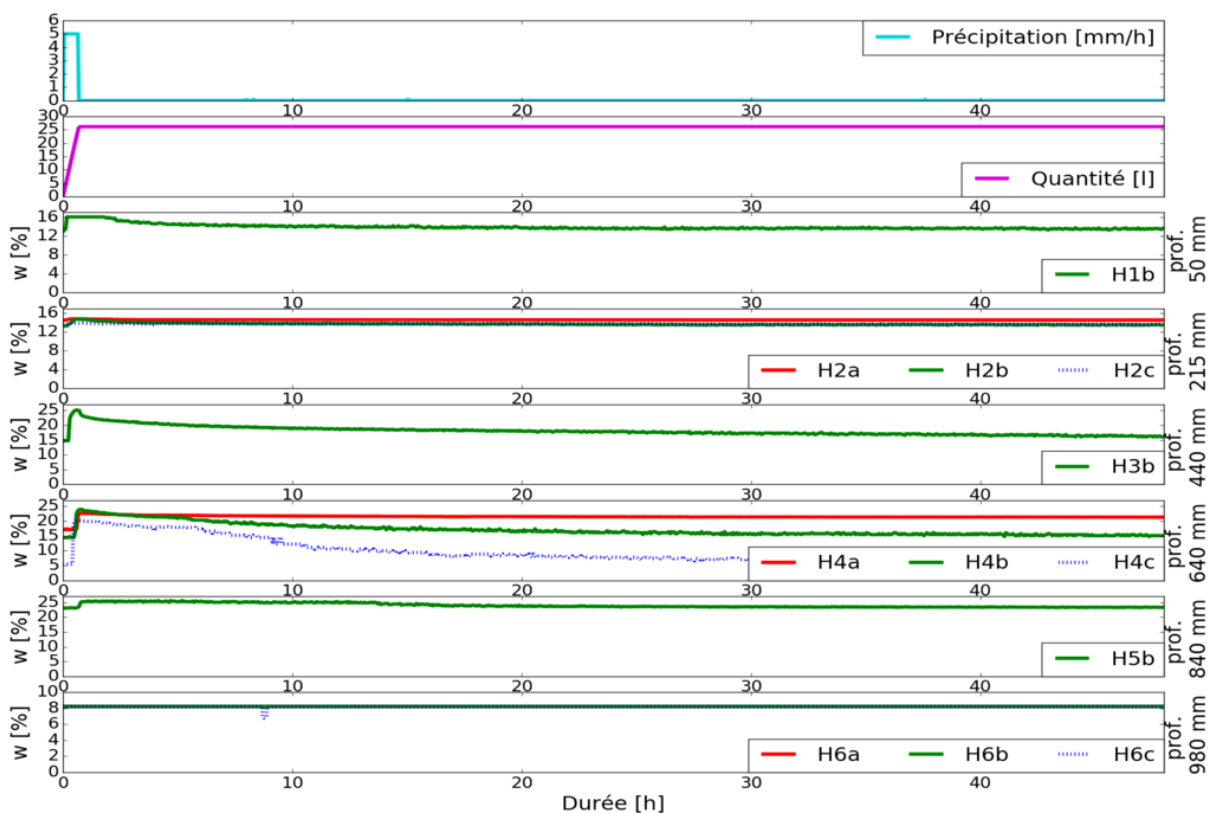


Figure 5.38 – Résultats expérimentaux du 5^{ème} essai avec un sol multicouche.

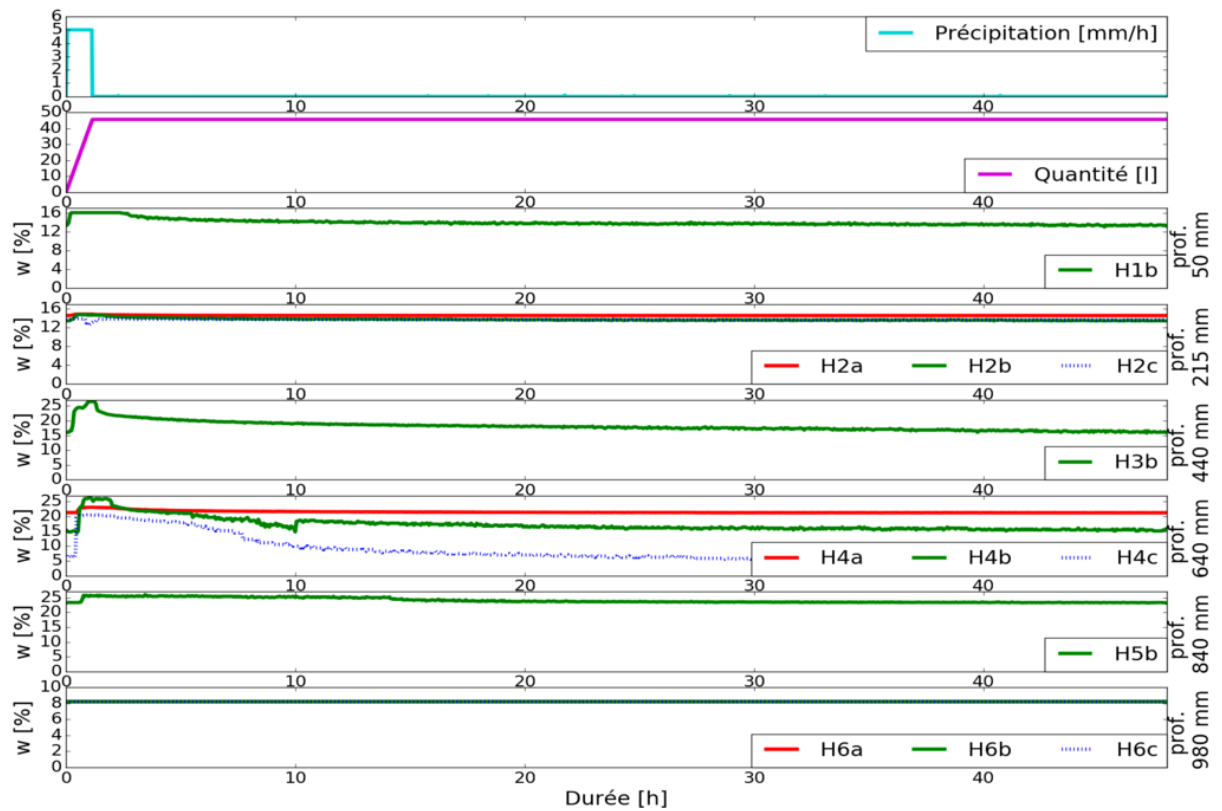


Figure 5.39 – Résultats expérimentaux du 6^{ème} essai avec un sol multicouche.

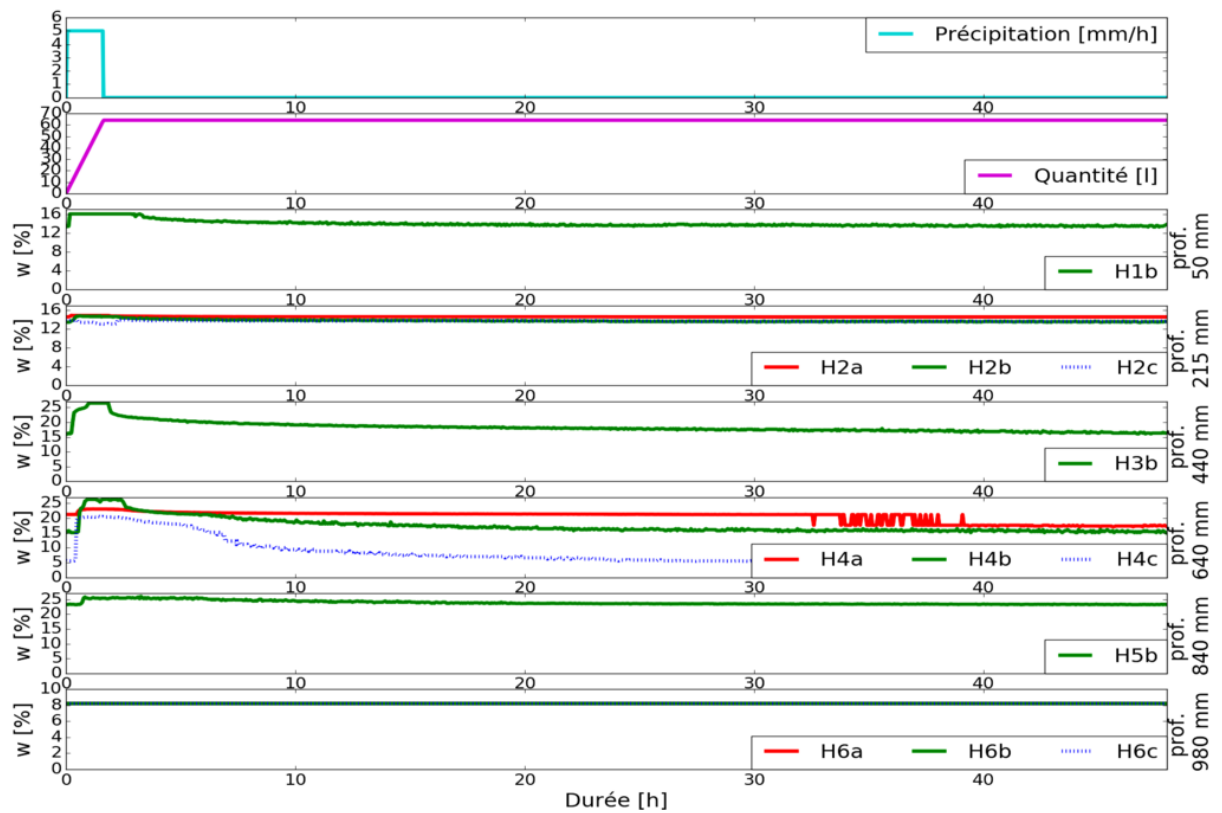


Figure 5.40 – Résultats expérimentaux du 7^{ème} essai avec un sol multicouche.

Annexe C : Méthode de détermination des grandeurs caractéristiques d'un profil de pluie

Les grandeurs caractéristiques $t_{initiale}$, $\omega_{initiale}$, t_{max1} , t_{max2} , ω_{max} , t_{finale} et ω_{finale} du profil "trapézoïdal" de teneur en eau d'un sol en fonction du temps sont déterminées automatiquement à partir d'un programme développé dans le langage Python. Un exemple du fonctionnement du programme est illustré par la figure 5.41. Dans le cas où le profil ne correspond pas aux mesures, un contrôle visuel permet de modifier les valeurs des grandeurs caractéristiques.

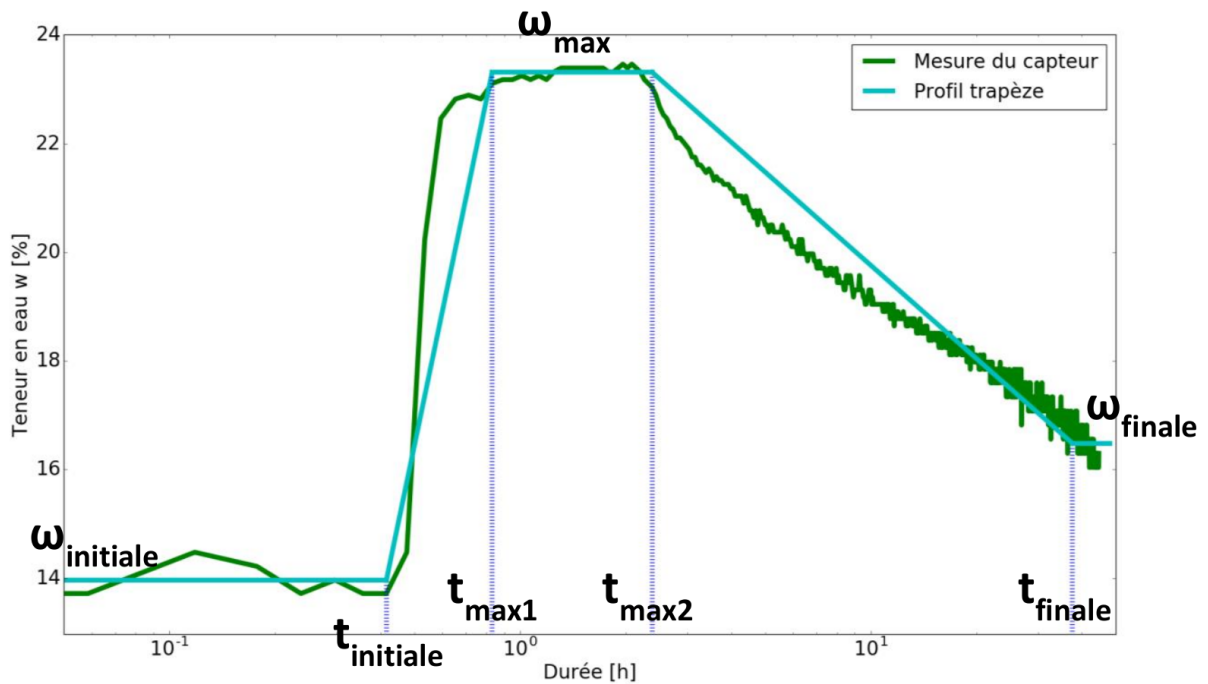


Figure 5.41 – Détermination des grandeurs caractéristiques du profil "trapézoïdal" de la teneur en eau d'un sol en fonction du temps.

Annexe D : Reconstitution du remblai et du gravier in-situ

De manière générale, la reconstitution d'un sol granulaire à partir d'autres sols respecte la loi fondamentale des mélanges granulaires. Celle-ci énonce :

Soit trois granulats (G1), (G2) et (G3) définis par leurs tamisats respectifs notés T1, T2, T3 pour $i = 1$ à n tamis.

Soit un mélange $M(\alpha, \beta, \gamma)$ de tamisat TM à partir de trois granulats avec les dosages α % de (G1), β % de (G2) et γ % de (G3).

On notera alors :

$$(M) = \alpha \% (G1) + \beta \% (G2) + \gamma \% (G3) \text{ avec } \alpha + \beta + \gamma = 100 \%$$

Ainsi, dans le cas de la reconstitution du remblai et du gravier in-situ, on procédera à un mélange de trois sols granulaires à partir de sable 0-4 mm (G1), de gravier 4-8 mm (G2) et de gravier 8-16 mm (G3).

Les valeurs de α , β et γ sont obtenues à partir des différentes courbes granulométriques avec $\alpha = TB1$, $\beta = TB2 - TB1$ et $\gamma = 1 - \alpha - \beta$.

Reconstitution du remblai in-situ

La reconstitution du remblai in-situ est réalisée à partir d'un mélange de 45 % de sable 0-4 mm, 24 % de gravier 4-8 mm et 31 % de gravier 8-16 mm. Les courbes granulométriques sont représentées sur la figure 5.42.

Reconstitution du gravier du fond in-situ

La reconstitution du gravier du fond in-situ est réalisée à partir d'un mélange de 42 % de sable 0-4 mm, 16 % de gravier 4-8 mm et 42 % de gravier 8-16 mm. Les courbes granulométriques sont représentées sur la figure 5.43.

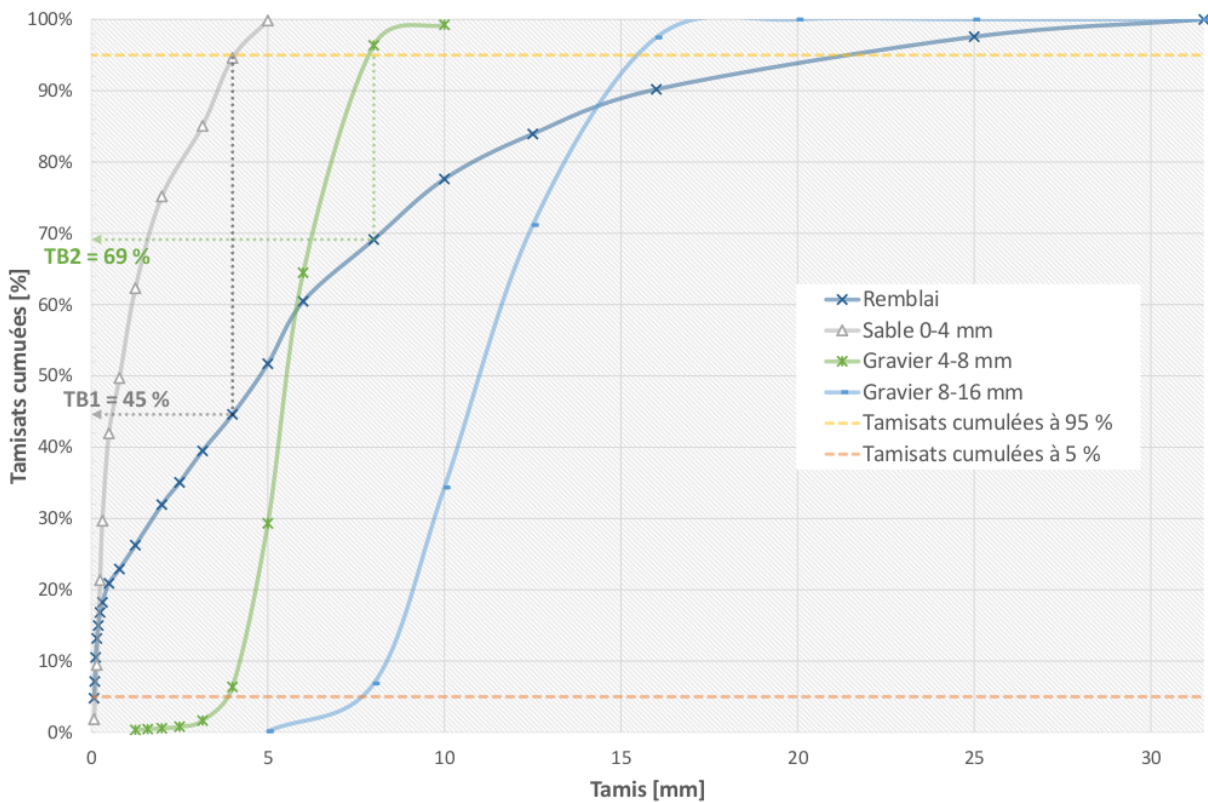


Figure 5.42 – Reconstitution du remblai in-situ à partir des courbes granulométriques du remblai in-situ, du sable 0-4 mm, du gravier 4-8 mm et du gravier 8-16 mm.

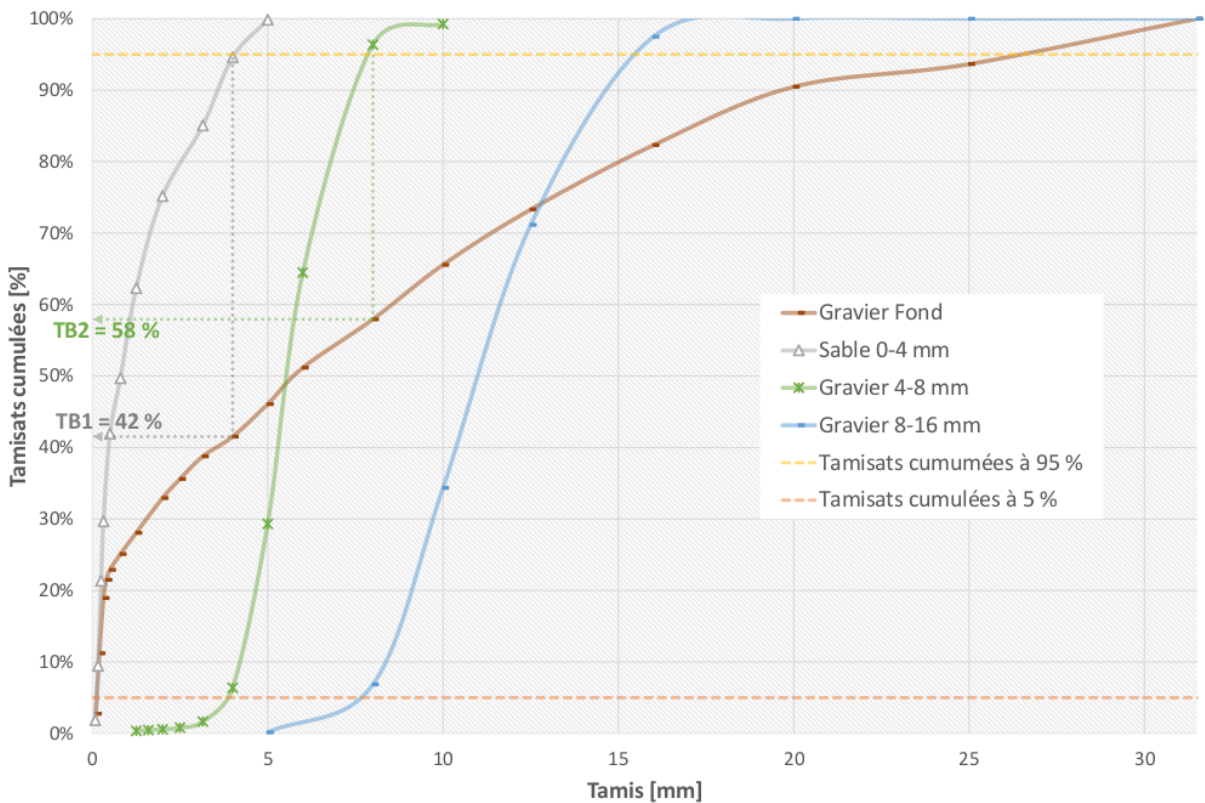


Figure 5.43 – Reconstitution du gravier du fond in-situ à partir des courbes granulométriques du gravier du fond in-situ, du sable 0-4 mm, du gravier 4-8 mm et du gravier 8-16 mm.

Annexe E : Principe de la modélisation d'un échangeur air-sol

La méthode utilisée pour modéliser l'interaction thermique entre le sol et un échangeur air-sol repose sur une méthode basée sur 4 étapes, voir la figure 5.44 :

- *étape n°0* : calcul du champ de température du sol initial pour l'instant $t = 0$;
- *étape n°1* : calcul de la température de l'air circulant dans l'échangeur air-sol pour l'instant t ;
- *étape n°2* : calcul du nouveau champ de température du sol avec les nouvelles conditions aux limites et l'interaction thermique échangeur-sol pour l'instant $t = t + \Delta t$ avec $\Delta t = 20 \text{ minutes}$ (durée entre deux mesures) ;
- *étape n°3* : calcul de la température de l'air circulant dans l'échangeur air-sol pour l'instant $t + \Delta t$ (*étape n°1*).

L'*étape n°0* consiste à déterminer le champ de température du sol initial à l'entrée de l'échangeur air-sol pour l'instant $t = 0$. Celui-ci est obtenu par un calcul en régime transitoire en appliquant l'équation de la chaleur avec les conditions aux limites suivantes : la température de surface $T_{surf}(t)$, la température de l'air à l'entrée de l'échangeur $T_{air,entrée} = T_{surf}(t)$ et la température géothermique $T_{géo}$. La condition initiale du champ de température est obtenue par un calcul en régime permanent en appliquant les mêmes conditions aux limites que précédemment mais à l'instant $t = -1 \text{ mois}$.

L'*étape n°1* permet de calculer la température de l'air circulant dans l'échangeur air-sol pour l'instant t . Le champ de température à l'instant t étant connu, le gradient de température dans le sol l'est aussi. Pour connaître la température de l'air à une longueur $x + \Delta x$, on suppose que le gradient de température est le même tout le long de cette longueur et que la puissance est transmise à l'air par un transfert thermique de type convectif (défini par un coefficient d'échange convectif h_{air}). A partir d'un bilan d'énergie, on peut en déduire la température de l'air à la longueur $x + \Delta x$.

L'*étape n°2* détermine le nouveau champ de température du sol à l'instant $t + \Delta t$ ($\Delta t = 20 \text{ minutes}$) par un calcul en régime transitoire en imposant la température de surface $T_{surf}(t)$, la température de l'air à l'entrée de l'échangeur $T_{air,entrée} = T_{surf}(t)$ et la température géothermique $T_{géo}$.

L'*étape n°3* détermine l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur air-sol pour l'instant $t + \Delta t$ en réalisant de nouveau l'*étape n°1*.

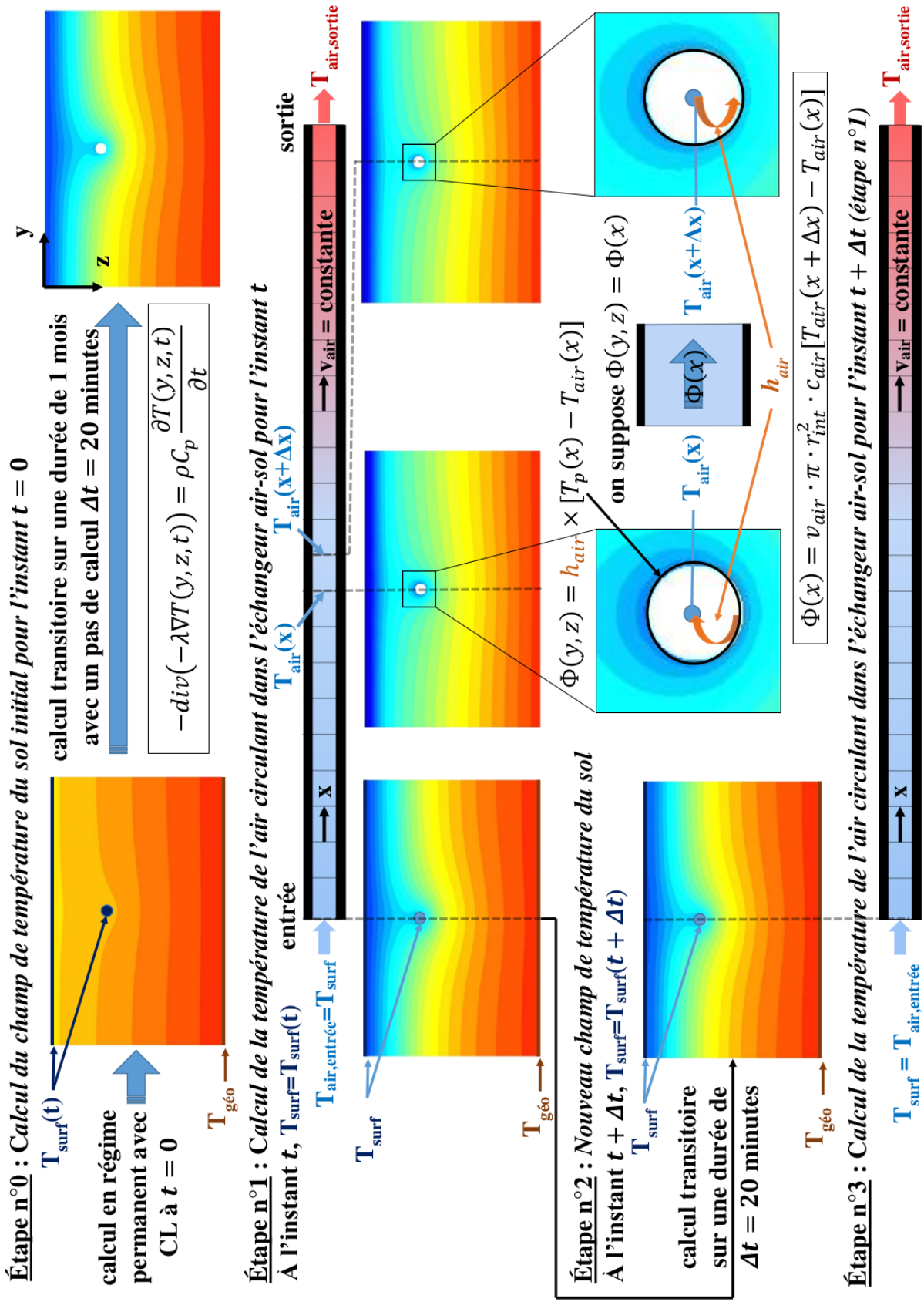


Figure 5.44 – Schéma de principe de la méthode de modélisation d'un échangeur air-sol.

Etude de l'impact des conditions géologiques et climatiques sur l'efficacité énergétique des systèmes géothermiques de surface

Résumé

Les systèmes géothermiques de surface extraient l'énergie du sol via un fluide caloporteur circulant dans un échangeur pour une profondeur ne dépassant pas 200 *m*. Deux typologies d'échangeurs sont généralement utilisées : les systèmes avec échangeurs verticaux, principalement affectés par les conditions géologiques ; et les échangeurs horizontaux, plus proches de la surface du sol, impactés essentiellement par les conditions climatiques.

Dans le sol, les échanges thermiques sont majoritairement des transferts de chaleur par conduction. Ainsi, les propriétés thermo-physiques du sol influencent la quantité d'énergie extraite par les échangeurs. Afin de quantifier les propriétés thermo-physiques d'un sol sous l'influence des conditions géologiques et climatiques, deux dispositifs expérimentaux sont élaborés, conçus, instrumentés et validés au sein de notre laboratoire. Les résultats expérimentaux enrichissent les connaissances scientifiques sur le comportement hydrique d'un sol soumis à des événements pluvieux et l'impact de la contrainte verticale sur les propriétés thermo-physiques d'un sol.

De plus, une étude numérique, à partir d'une modélisation 2D par éléments finis d'un échangeur air-sol, évalue les performances énergétiques de ce dernier en fonction de différentes humidifications du sol et différents scénarios de pluie. Les résultats numériques révèlent ainsi l'intérêt d'utiliser un sol d'enrobage très humide pour accroître significativement les performances énergétiques d'un échangeur air-sol.

Mots clés: systèmes géothermiques de surface, efficacité énergétique, conditions géologiques, conditions climatiques.

Abstract

Surface geothermal systems extract energy from the ground via a fluid circulating in an exchanger at a depth not exceeding 200 *m*. Two typologies of exchangers are generally used: systems with vertical exchangers, mainly affected by geological conditions; and horizontal exchangers, closer to the surface of ground, impacted mainly by weather conditions.

Thermal exchanges in the soil are mainly conduction heat transfers. Thus, thermo-physical properties of soil influence, mostly, energy extracted by exchangers. In order to quantify influence of geological and meteorological conditions on thermo-physical properties of soil, two experimental devices are developed, designed, instrumented and validated. The experimental results provide more appropriate scientific knowledge on hydric behavior of a soil subjected to rain events and influence of compactness on thermal properties of soil. In addition, one numerical study, based on a finite element 2D modeling of an earth-air heat exchanger, evaluates their energy performance under different soil moisture conditions and rain scenarios thus revealing the utility of water to significantly improve its performance.

Keywords: geothermal systems, energy efficiency, geological conditions, climatic conditions.